

УДК 625.78

А.Г. Рымаров, Д.Г. Титков

ФГБОУ ВПО «МГСУ»

ОСОБЕННОСТИ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ В МАССИВ ГРУНТА ПОДЗЕМНОГО КОММУНИКАЦИОННОГО КОЛЛЕКТОРА

Представлен тепловой баланс подземного коммуникационного коллектора и основные виды потерь теплоты подземных сооружений в массив грунта. Примененные методы расчета дают возможность определить необходимую мощность системы отопления в зависимости от времени топа для подземного коммуникационного коллектора, расположенного на разной глубине под поверхностью земли.

Ключевые слова: коммуникационный коллектор, потери теплоты, тепловой баланс, теплопоступления, температура грунта.

Подземный коммуникационный коллектор — это производственный объект, представляющий собой протяженное подземное сооружение для укладки в нем коммуникаций: теплопроводов систем теплоснабжения; труб холодного водоснабжения, водоотведения; силовых электрических кабелей и слаботочных кабелей связи. Решение задач вентиляции и обеспечения заданного температурного режима любых подземных сооружений, в частности подземных коллекторов, неразрывно связано с исследованием их теплового, влажностного, газового и воздушного режимов, которые взаимосвязаны между собой [1].

В данной статье рассматривается тепловой баланс подземного коллектора, который складывается из поступлений теплоты от инженерного оборудования и из потерь теплоты коллектором в массив грунта, что определяет температурный режим коллектора [2]. Теплота поступает в коллектор, в основном от теплопроводов системы теплоснабжения $Q_{т.с.}$; паропроводов $Q_{п.}$; конденсатопроводов $Q_{к.}$ и силовых электрических кабелей $Q_{каб.}$. Теплопотери подземного коллектора складываются из потерь теплоты через ограждающие конструкции в грунт $Q_{гр.}$, на нагрев вентиляционного воздуха $Q_{в.}$ и на нагревание воды для теплоснабжения системы вентиляции $Q_{т.}$ в том случае, если стоит водяной воздухоподогреватель системы вентиляции.

В общем виде тепловой баланс подземного коммуникационного коллектора —

A.G. Rymarov, D.G. Titkov

MGSU

FEATURES OF HEAT LEAKAGE INTO SOIL BODY OF UNDERGROUND COMMUNICATION COLLECTOR

In the article the heat balance of underground communication collector is presented as well as the main types of heat leakages of underground structures into soil body. The authors consider such calculation methods as Forchheimer formula, the calculation method of Prof. V.D. Machinsky, the method of Teploelectroproekt Institute and the formula of Prof. O.E. Vlasov. The applied calculation methods give the possibility to estimate the necessary power of heating system depending on the season for an underground collector situated at different depths under the ground level.

Key words: underground communications collector, heat loss, heat balance, heat input, ground temperatures.

Underground communication collector is a production object presented as a long underground construction for laying utility systems: pipelines, heat supply systems, cold-water supply and water disposal pipes, electrical power cables and sound cables. Solving the tasks of ventilation and providing temperature specifications of any underground structures, in particular, underground collectors, is tightly bounded to investigation of their heat, humidity, gas and air modes, which are connected with one another [1].

In the given article the authors consider the heat balance of underground collector, which is composed of heat from engineering equipment and heat losses of the collector into soil, which determines the temperature node of the collector [2]. The heat comes into the collector generally from heating pipes of heat supply system $Q_{т.с.}$; steam pipes $Q_{п.}$; condensate piping $Q_{к.}$ and electrical power cables $Q_{каб.}$. Heat losses of underground collector are composed of heat losses through enveloping structures to the soil $Q_{гр.}$, heating of ventilation air $Q_{в.}$, and heating of water for heat supply of ventilation system $Q_{т.}$ in case aquatic air heater of ventilation system is used. In general terms the heat balance of underground communication collector would be expressed as:

$$Q_{т.с} + Q_{п} + Q_{к} + Q_{каб} = Q_{гр} + Q_{в} + Q_{т}. \quad (1)$$

Для определения составляющих теплового баланса необходимо рассмотреть теплообмен подземного коллектора с грунтом. Коллектор можно рассматривать как подземное сооружение, имеющее определенное поперечное сечение. Длина коллектора по сравнению с размерами поперечного сечения бесконечно велика. Остановимся более подробно на одной из составляющих теплового баланса, а именно на потерях теплоты в массив грунта.

Теплопотери одного погонного метра подземного коллектора через ограждающие конструкции и массив грунта определяются приведенным сопротивлением теплопередачи от внутреннего воздуха в коллекторе к наружному воздуху, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, и разностью температур внутреннего воздуха в коллекторе и наружного воздуха, °C .

Величина приведенного сопротивления теплопередачи зависит от глубины заложения коллектора H , м, формы и размеров поперечного сечения коллектора (высота — a ; ширина — b или \emptyset , м), физических характеристик грунта (теплопроводность $\lambda_{гр}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; влажность $\varphi_{гр}$, %; температура $t_{гр}$, °C) и условий теплообмена с воздухом на внутренней поверхности коллектора и на поверхности грунта.

В настоящее время известны несколько методов расчета теплопотерь подземными сооружениями. Для расчета теплопотерь коллектора, заглубленного в грунт, применима формула Форхгеймера, Вт

$$Q = \frac{\tau_{в} - \tau_{н}}{\frac{1}{2\pi\lambda_{гр}} \ln \left(2 \frac{H}{d_3} + \sqrt{4 \frac{H^2}{d_3^2} - 1} \right)}, \quad (2)$$

где $\tau_{в}$ — температура поверхности коллектора, °C ; $\tau_{н}$ — температура поверхности грунта, °C ; $\lambda_{гр}$ — коэффициент теплопроводности грунта, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; H — глубина заложения оси коллектора, м; d_3 — эквивалентный диаметр, м.

Формула Форхгеймера не учитывает формы поперечного сечения коллектора, повышение теплопотерь в углах и других теплонеоднородностях коллектора, а также изменение теплопроводности грунта в различных слоях.

Для расчета теплопотерь подземных сооружений также пользуются методикой расчета профессора В.Д. Мачинского. Этот метод учитывает форму коллектора и различные характе-

In order to define the components of heat balance it is necessary to consider the heat exchange of the underground collector with soil. The collector can be regarded as an underground construction with definite cross section. The collector length as compared to cross section size is infinitely big. Let us focus on one of heat balance components in more detail, namely on heat losses in soil body.

Heat losses of one running meter of underground collector through enveloping structures and soil body are defined by the reduced total thermal resistance of inside air in the collector to the outside air, $(\text{m}^2 \cdot \text{°C})/\text{W}$, and temperature difference of inside air in the collector and outside air, °C .

The value of the reduced total thermal resistance depends on the laying depth of the collector H , m, form and sizes of its cross section (height — a ; width — b or \emptyset , m), physical characteristics of the soil (thermal conductivity $\lambda_{гр}$, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$; humidity $\varphi_{гр}$, %; temperature $t_{гр}$, °C) and heat-exchange conditions with the air on the inner surface of the collector and on soil surface.

At the present moment several calculation methods for heat losses of underground structures are known. Forchheimer formula, W, is applicable for heat losses calculation of a collector buried in the ground

where $\tau_{в}$ — is the temperature of the collector surface, °C ; $\tau_{н}$ — the temperature of the ground surface, °C ; $\lambda_{гр}$ — heat conduction coefficient, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$; H — laying depth of the collector, m; d_3 — equivalent diameter, m.

Forchheimer formula doesn't take into account the cross section forms of the collector, increase of heat losses in the corners and other thermal heterogeneities, as well as changes on thermal conductivity of soil at different layers.

The method of Prof. V.D. Machinsky are also used in order to calculate heat losses of underground structures. This method ac-

ристики грунта в зависимости от глубины заложения. Теплотери по методике В.Д. Мачинского рассчитываются по частям: теплотери через перекрытия, стены и пол. Коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°С, определяется следующим образом:

$$k = \frac{1}{\frac{1H}{\alpha_n} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_{гр}}{\lambda_{гр}} + \frac{1}{\alpha_b}}, \quad (3)$$

где α_n — коэффициент теплообмена от наружной поверхности земли к наружному воздуху, Вт/(м²·°С); $\sum \delta/\lambda$ — сумма термических сопротивлений слоев конструкции коллектора, (м²·°С)/Вт; $\delta_{гр}/\lambda_{гр}$ — термическое сопротивление грунта над перекрытием, (м²·°С)/Вт; α_b — коэффициент теплообмена от воздуха внутри коллектора к внутренней поверхности коллектора, Вт/(м²·°С).

Теплотери, Вт, через конструкции стен и пол определяются следующей формулой:

$$Q_{ст} = \sqrt{k\lambda_{гр} \left(a + \frac{e}{2} \right)} (t_b - t_n), \quad (4)$$

где k — коэффициент теплопередачи перекрытия коллектора, Вт/(м²·°С); $\lambda_{гр}$ — коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м²·°С); a — высота коллектора, м; e — ширина коллектора, м; t_b — температура воздуха под перекрытием коллектора, °С; t_n — температура наружного воздуха, °С.

Общие теплотери, Вт, подземного коллектора определяются по следующей формуле:

$$Q = kF + 2\sqrt{k\lambda_{гр} \left(a + \frac{e}{2} \right)} (t_b - t_n). \quad (5)$$

Метод расчета профессора В.Д. Мачинского позволяет учитывать форму коллектора, но не учитывает увеличение теплотерии через углы, стыки перекрытий и другие теплоненормодности коллектора.

Для расчета теплотерии подземных сооружений, Вт, применяется методика, предложенная институтом Теплоэлектропроект в 1956 г., которая выражается следующей формулой

$$Q = A(t_b - t_n)f_n + (Bt_b - Ct_n - 0,4t_{гр})f_{ст} + 0,85(t_b - t_{гр})f_{дн}, \quad (6)$$

counts for the form of the collector and different soil characteristics depending on laying depth. According to the method of V.D. Machinsky heat losses are calculated by parts: heat losses through slabs, walls and floor. Heat transfer coefficient, W/m²·°C, is calculated as:

where α_n — is heat transfer coefficient from the outer ground surface to outside air, W/(m²·°C); $\sum \delta/\lambda$ — the sum of thermal resistances of the structures' layers of the collector, (m²·°C)/W; $\delta_{гр}/\lambda_{гр}$ — thermal resistances of the soil over the slab, (m²·°C)/W; α_b — heat transfer coefficient from the air inside the collector to the inner surface of the collector, W/(m²·°C).

Heat losses, W, through the structures of walls and the floor are calculated by the formals:

where k — is heat transfer of the slab of the collector, W/(m²·°C); $\lambda_{гр}$ — the coefficient of thermal conductivity of the soil; a — the height of the collector, m; e — the width of the collector, m; t_b — air temperature under the slab of the collector, °C; t_n — the temperature of outer air, °C.

General heat losses, W, of underground collector are calculated according to the formula:

The calculation method of Prof. V.D. Machinsky helps accounting for the form of the collector, but it doesn't account for the increase of heat losses through the angles, slab joints and other thermal heterogeneities of the collector.

In order to calculate heat losses of underground structures, W, the method offered in 1956 by the institute Teploelektroproekt is applied, which is expressed by the formula:

где t_n — температура наружного воздуха, °C; $t_{гр}$ — естественная температура грунта на глубине заложения коллектора, °C; $f_n, f_{ст}, f_{дн}$ — внутренняя поверхность перекрытия, стен и дна, м²/п.м; A, B, C — коэффициенты, зависящие от климатических поясов и расчетного времени года.

Методика Теплоэлектропроекта учитывает климатические условия района строительства, естественную температуру грунта на глубине заложения коллектора и форму поперечного сечения коллектора, но не учитывает заглубление коллектора от поверхности земли и теплопроводность грунта.

Согласно методике расчета теплопотерь, Вт, в тоннелях метрополитена с глубиной заложения менее 10 м, предложенной Б.А. Казанцевым, предлагается следующая формула:

$$Q = kF(t_b - t_{гр})z, \quad (7)$$

где k — расчетный коэффициент теплопередачи для плоской стенки, Вт/(м²·°C); F — площадь поверхности ограждающей конструкции с учетом криволинейности стенки, м²; t_b — температура внутри тоннеля, °C; z — время теплохода, ч.

Максимальная и минимальная температуры грунта, °C, определяются по формуле профессора О.Е. Власова

$$t_{гр}^p = t_{пов}^{cp} + \frac{H}{30} - \frac{h}{220} \pm \frac{A_{t_{пов}}}{eH\sqrt{\frac{\pi}{az}}}, \quad (8)$$

где $t_{пов}^{cp}$ — средняя температура поверхности грунта, °C; H — заданная глубина от поверхности земли, м; h — повышение рассматриваемой точки местности над уровнем моря, м; $A_{t_{пов}}$ — амплитуда колебаний температуры на поверхности грунта, °C; e — основание натурального логарифма; $\sqrt{\frac{\pi}{az}}$ — логарифмический декремент затухания.

Указанные методы расчета дают возможность определить необходимую мощность системы отопления в зависимости от времени натопа, для подземного коммуникационного коллектора, расположенного на разных глубинах под поверхностью земли. Для подземных сооружений теплопотери в массив грунта непрерывно изменяются во времени и имеют нестационарный режим [3, 4], что влияет на динамику микроклимата в подземных соору-

where t_n — outer air temperature, °C; $t_{гр}$ — is the natural temperature of the soil on the depth of the collector laying, °C; $f_n, f_{ст}, f_{дн}$ — the inner surface of the slab, walls and floor, м²/rm; A, B, C — the coefficients depending on climatic zones and estimated season.

The method of Teploelektroproekt accounts for climatic conditions of the region of construction, natural soil temperature on the depth of the collector laying and the cross-section form of the collector, but it doesn't account for the burial depth of the collector from the ground surface and heat conductivity of soil.

According to heat losses calculation methods, W, in subway tunnels with the depth of less than 10 m, offered by B.A. Kazantsev, the following formula is offered:

where k — is the estimated coefficient of heat transfer for a flat wall, W/(m²·°C); F — the surface area of the enveloping structure regarding the curvature of the wall, м²; t_b — the temperature inside the tunnel, °C; z — the time of heat loss, h.

Maximal and minimal soil temperatures, °C, are defined according to the formula of Prof. O.E. Vlasov

where $t_{пов}^{cp}$ — average temperature of soil surface, °C; H — the preset depth from the earth surface, m; h — the rise of the observed area point above sea level, m; $A_{t_{пов}}$ — temperature oscillation amplitude on soil surface, °C; e — base of the natural logarithm; $\sqrt{\frac{\pi}{az}}$ — damping constant.

The considered calculation methods make it possible to define the necessary capacity of the heating system depending on heating term for an underground communication collector situated at different depths under the earth surface. Heat losses into the soil body in underground structures are constantly changing in time and are of time varying character [3, 4], which influences the dynamics of the microclimate in under-

жениях с учетом «коэффициента интеллекта зданий» (BIQ) [5].

Представленные методы расчета потерь теплоты дают разные значения $R_{пр}$, которые совпадают только при некоторых условиях в определенных диапазонах соотношений размеров коллектора в поперечном сечении и при определенной глубине заложения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рымаров А.Г. Прогнозирование параметров воздушного, теплового, газового и влажностного режимов помещений здания // *Academia. Архитектура и строительство*. 2009. № 5. С. 362—364.

2. Казнин Е.В., Рымаров А.Г., Лушин К.И. Особенности формирования воздушно-теплового режима коллектора для подземных коммуникаций // *Теоретические основы теплогоснабжения и вентиляции : материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф.* 21—23 ноября 2007. М. : МГСУ, 2007. С. 203—205.

3. Рымаров А.Г., Лушин К.И. Особенности расчета теплового режима здания с массивными ограждающими конструкциями в холодный период года // *Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование»*. 2012. Вып. 2. Ст. 5. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru/index.php/sno/pages/view/02-2012>.

4. Рымаров А.Г., Лушин К.И. Особенности расчета теплового режима линейных подземных сооружений на примере автотранспортного тоннеля // *Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование»*. 2011. Вып. 2. Ст. 5. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru/index.php/sno/pages/view/02-2011>.

5. Волков А.А. Интеллект зданий: формула // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 3. С. 54—57.

Поступила в редакцию в июле 2014 г.

Об авторах: **Рымаров Андрей Георгиевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры отопления и вентиляции, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, rymarov@yandex.ru;

Титков Дмитрий Геннадьевич — ассистент кафедры отопления и вентиляции, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, titkov1000@gmail.com.

Для цитирования:

Рымаров А.Г., Титков Д.Г. Особенности потерь теплоты в массив грунта подземного коммуникационного коллектора // *Строительство: наука и образование*. 2014. № 4. Ст. 2. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.

For citation:

Rymarov A.G., Titkov D.G. Osobennosti poter' teploty v massiv grunta podzemnogo kommunikatsionnogo kolektora [Features of Heat Leakage into Soil Body of Underground Communication Collector]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2014, no. 4, paper 2. Available at: <http://www.nso-journal.ru>. (In Russian)

ground structures with account for IQ of a building (BIQ) [5].

The presented calculation methods of heat losses give different values of $R_{пр}$, which coincide only at some conditions in definite ranges of dimension ratio of a collector at cross section and at definite laying depth.

REFERENCES

1. Rymarov A.G. Prognozirovanie parametrov vozdušnogo, teplovogo, gazovogo i vlazhnostnogo rezhimov pomeshcheniy zdaniya [Forecasting the Parametres of Air, Heat, Gas and Humidity Modes of the Building Premises]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2009, no. 5, pp. 362—364. (In Russian)

2. Kaznin E.V., Rymarov A.G., Lushin K.I. Osobennosti formirovaniya vozdušno-teplovogo rezhima kolektora dlya podzemnykh kommunikatsiy [Features of Generating Air and Heat Mode of a Collector for Underground Communications]. *Teoreticheskie osnovy teplogosnabzheniya i ventilyatsii : Materialy Vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 21—23 noyabrya 2007* [Theoretical Basis of Heat and Gas Supply and Ventilation : Materials of the second International Science and Practice Conference, November 21—23, 2007]. Moscow, MGSU Publ., pp. 203—205. (In Russian)

3. Rymarov A.G., Lushin K.I. Osobennosti rascheta teplovogo rezhima zdaniya s massivnymi ograždayushchimi konstruktsiyami v kholodnyy period goda [Heavy Envelope Buildings: Thermal Analysis for the Winter Season]. *Nauchno-prakticheskii Internet-zhurnal «Nauka. Stroitel'stvo. Obrazovanie»* [Science, Construction, Education]. 2012, no. 2, p. 5. Available at: <http://www.nso-journal.ru/index.php/sno/pages/view/02-2012>. (In Russian)

4. Rymarov A.G., Lushin K.I. Osobennosti rascheta teplovogo rezhima lineynykh podzemnykh sooruzheniy na primere avtotransportnogo tonnelya [Features of Thermal Behavior Calculating of Linear Buried Structures as Exemplified by Automotive Tunnel]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Science: Construction and Education]. 2011, no. 2, p. 5. Available at: <http://www.nso-journal.ru/index.php/sno/pages/view/02-2011>. (In Russian)

5. Volkov A.A. Intellect zdaniy: formula [Intelligence of Buildings: Formula]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2012, no. 3, pp. 54—57. (In Russian)

Received in July 2014.

About the authors: **Rymarov Andrey Georgievich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Heating and Ventilation, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; rymarov@list.ru;

Titkov Dmitriy Gennad'evich — Assistant Lecturer, Department of Heating and Ventilation, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; titkov1000@gmail.com.