

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.921.47

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.8

Расход тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне станций метрополитена

Самвел Володяевич Саргсян¹, Сергей Валерьевич Мазейн²¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*² *Тоннельная ассоциация России (ТАР); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. При строительстве объектов метрополитена выполнение архитектурно-отделочных и монтажных работ начинается до завершения основных конструкций. В это время подключение к сетям постоянного теплоснабжения отсутствует, поэтому для соблюдения технологии производства работ необходимо применение временных источников теплоты. Отсутствие конкретных сведений по требуемым мощностям таких источников делает невозможным прогнозирование финансовых затрат, что является существенным для подрядчиков. Цель исследования — определение удельной величины расхода тепловой энергии на отопление станций метрополитена, строительство которых выполняется открытым способом, в зависимости от различных температур наружного воздуха, завершенности строительства, глубины заложения станции, а также строительного объема станции.

Материалы и методы. Тепловые потоки вычислены с помощью математического моделирования стационарного теплового режима. Анализы результатов расчетов и нормативных данных выполнены в соответствии с положениями теории вероятности и математической статистики. Вычисления коэффициентов и нагрузок проведены по общепринятым уравнениям и законам теплообмена. Климатические данные и параметры материалов принимаются по действующим нормативным документам.

Результаты. Вычислены значения удельной тепловой характеристики станций метрополитена, сооружаемых открытым способом, в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений, состава наружных ограждений, а также стадии завершения строительства (в том числе наличия или отсутствия обратной засыпки). Расчетная норма расхода тепловой энергии на временное отопление законченной вчерне станции метрополитена, сооружаемой открытым способом, составляет 3,87 Гкал/(1000 м³·мес).

Выводы. Предложены нормы на временное отопление (количество тепловой энергии) для станций метрополитена, сооружаемых открытым способом. Определены тепловые затраты на обеспечение заданных параметров воздуха, отнесенные к единице объема и необходимые для производства строительных и монтажных работ внутри станций в течение отопительного периода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловая энергия, временное отопление, тепловая характеристика, трансмиссионные теплопотери, инфильтрационные теплопотери, станция метрополитена

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саргсян С.В., Мазейн С.В. Расход тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне станций метрополитена // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.8

Автор, ответственный за переписку: Самвел Володяевич Саргсян, SargsyanSV@mgsu.ru.

Heat consumption for temporary heating of underground stations under construction

Samvel V. Sarsyan¹, Sergey V. Mazein²¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;*² *Russian Tunneling Association (RTA); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. During construction of underground facilities, architectural, finishing and installation works begin before the completion of the main structures. At that time, there is no permanent heating network connection and therefore temporary heat sources must be used to ensure compliance with the works technology. The lack of specific information about the required capacity of such sources makes it impossible to forecast the financial costs, which is essential for contractors. The purpose of the study is to determine the specific value of heat energy consumption for heating underground stations, construction of which is carried out by open method, depending on different outdoor temperatures, construction completion, depth of station installation, as well as the construction volume of the station.

Materials and methods. Heat flows have been calculated by means of mathematical modelling of a stationary thermal regime. Analyses of calculation results and normative data have been performed in accordance with the provisions of

probability theory and mathematical statistics. Calculation of coefficients and loads are carried out according to generally accepted equations and laws of heat and mass exchange. Climatic data and material parameters are taken according to current normative documents.

Results. The values of specific thermal performance of open-cut metro stations depending on space-planning and design solutions, composition of external envelopes, as well as the stage of construction completion (including the presence or absence of backfill) are calculated. Estimated rate of heat energy consumption for temporary heating of open cut metro station is 3.87 Gcal/(1,000 m³·month).

Conclusions. Temporary heating norms (amount of heat energy) for open-circuit metro stations have been proposed. Heat costs for ensuring the specified air parameters, referred to a unit volume and required for construction and installation works inside the stations during the heating period, are determined.

KEYWORDS: thermal energy, temporary heating, thermal performance, transmission heat loss, infiltration heat loss, metro station

FOR CITATION: Sarsyan S.V., Mazein S.V. Heat consumption for temporary heating of underground stations under construction. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.8

Corresponding author: Samvel V. Sarsyan, SargsyanSV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве объектов метрополитена с учетом графика строительства выполнение архитектурно-отделочных и монтажных работ начинается до завершения работ по основным конструкциям и при отсутствии подключения к сетям постоянного теплоснабжения, что требует применения временных источников теплоты (теплогенераторы или электрокалориферы) в холодный период. Получение удельной величины расхода тепловой энергии на временное отопление станций метрополитена, строительство которых осуществляется открытым способом, позволит оперативно определять величину расхода тепловой энергии завершающихся вчерне станций метрополитена.

Тема строительства метрополитена, несмотря на высокий уровень ответственности и сложности сооружений, представлена в отечественных периодических изданиях достаточно скромно. Наибольшее количество публикаций посвящено вопросам геотехники [1–5] и некоторым прикладным проблемам, как, например, противодействие вибрации [6] и влияние на застройку [7, 8]. Ряд работ раскрывает вопросы, связанные с оптимизацией пассажиропотока [9, 10], с решением прикладных задач [11–13], а также некоторые аспекты нетехнического характера [14–18]. Области теплогазоснабжения и вентиляции, в которых рассматриваются вопросы организации воздухообмена на станциях, посвящено мало трудов [19–21].

Цель исследования — определение удельной величины расхода тепловой энергии на отопление станций метрополитена, строительство которых выполняется открытым способом, в зависимости от различных температур наружного воздуха, завершения строительства, глубины заложения станции, а также строительного объема станции.

Задачи:

- исследование конструктивных элементов станций метрополитена, строительство которых выполняется открытым способом;
- определение трансмиссионных теплопотерь и затрат на нагрев инфильтрационного (вентиля-

ционного) воздуха в зависимости от технического состояния элементов наружных ограждающих конструкций станций метрополитена, строительство которых выполняется открытым способом;

- установление производительности систем отопления с учетом расхода теплоты на нагрев вентиляционного (инфильтрующегося) воздуха;

- определение статистически-аналитическим методом величины удельной тепловой характеристики станции метрополитена в зависимости от принятой классификации и заданных параметров воздуха;

- расчеты трансмиссионных тепловых потоков с помощью математического моделирования;

- выявление значения удельной тепловой характеристики станций метрополитена, строительство которых осуществляется открытым способом, в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений, а также состава наружных ограждающих конструкций, стадии завершения строительства (в том числе наличия или отсутствия обратной засыпки) и строительного объема объекта;

- определение нормы на временное отопление (количество тепловой и электрической энергии) станций метрополитена от временных источников отопления в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений и заданных параметров воздуха;

- определение затрат тепловой энергии на обеспечение заданных параметров воздуха для производства внутри сооружений строительных и монтажных работ в течение отопительного периода с 10 октября по 10 апреля, отнесенных к единице строительного объема.

По расположению относительно уровня земли станции метрополитена подразделяются на эстакадные, наземные, подземные. Подземные станционные комплексы могут сооружаться открытым способом в котлованах [22], полужакрытым способом без вскрытия дневной поверхности грунта [23], закрытым способом работ [24].

В рамках научно-технического сопровождения проектирования и строительства Московского метрополитена [25] на объекте «Восточный участок

Третьего пересадочного контура станция «Каширская» – станция «Карачарово»» предусматривалось определение нормативной величины на временное отопление от временных источников теплоснабжения законченных вчерне станций метрополитена, сооружение которых выполняется открытым способом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Конструктивные элементы станций метрополитена, сооружение которых выполняется открытым способом, разделены на четыре группы: покрытие – верхнее перекрытие станции метрополитена; стены; пол по грунту; колонны. Основной конструкционный материал — железобетон. Расчет теплопотерь через ограждающие конструкции (стены и пол) в грунте проводится в соответствии с нормативной литературой [1]. Теплопроводность грунта $\lambda_{гр}$, граничащего с фундаментом станции метрополитена, в расчетах принята равной $1,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (базовая расчетная теплопроводность грунта). Определение величин трансмиссионных и инфильтрационных (вентиляционных) теплопотерь осуществляется для характерной станции метрополитена, выбранной на основании обобщенных архитектурных данных проектируемых и действующих станций метрополитена. На рис. 1 представлен поперечный разрез характерной станции метрополитена.

Поперечный разрез характерной станции метрополитена, выполняемой открытым способом без обратной засыпки, показан на рис. 2. На рис. 3 приведен поперечный разрез характерной станции метрополитена, выполняемой открытым способом работ с обратной засыпкой грунта.

Расчет величин трансмиссионных теплопотерь, наблюдаемых на первом этапе строительства в холодный период, при проведении архитектурно-отделочных и монтажных работ конца 2-го и начала 3-го года (рис. 2) в построенных помещениях станции метрополитена с открытым способом без обратной засыпки, представлен в табл. 1. Аналогичный расчет для второго этапа строительства в холодный период при выполнении архитектурно-отделочных и монтажных работ конца 2-го и начала 3-го года (рис. 3), но уже с обратной засыпкой, приведен в табл. 2. На основании выполненных расчетов трансмиссионных теплопотерь определили величину средней удельной тепловой характеристики станции:

$$q_{ср} = (q_0 + q_{100}) / 2 = (4,59 + 1,4) = 2,995 \text{ Вт}/\text{м}^3. \quad (1)$$

Для расчета вентиляционных (инфильтрационных) теплопотерь следует установить часовой расход поступающего наружного воздуха в строящуюся открытым способом станцию метрополитена. Вентиляционный воздух поступает на станцию через периодически открывающиеся двери, ворота, проемы и неплотности в наружных ограждениях. Через воздухопроницаемые конструкции (тентовые конструкции, сооружаемые по торцовым участкам станции) воздух проникает инфильтрацией. По результатам анализа большого количества станций сделан вывод о том, что независимо от объема станции, площади технических проемов, периодически открывающихся дверей, а также площади воздухопроницаемых конструкций (тентовые конструкции) остаются относительно постоянными величинами.

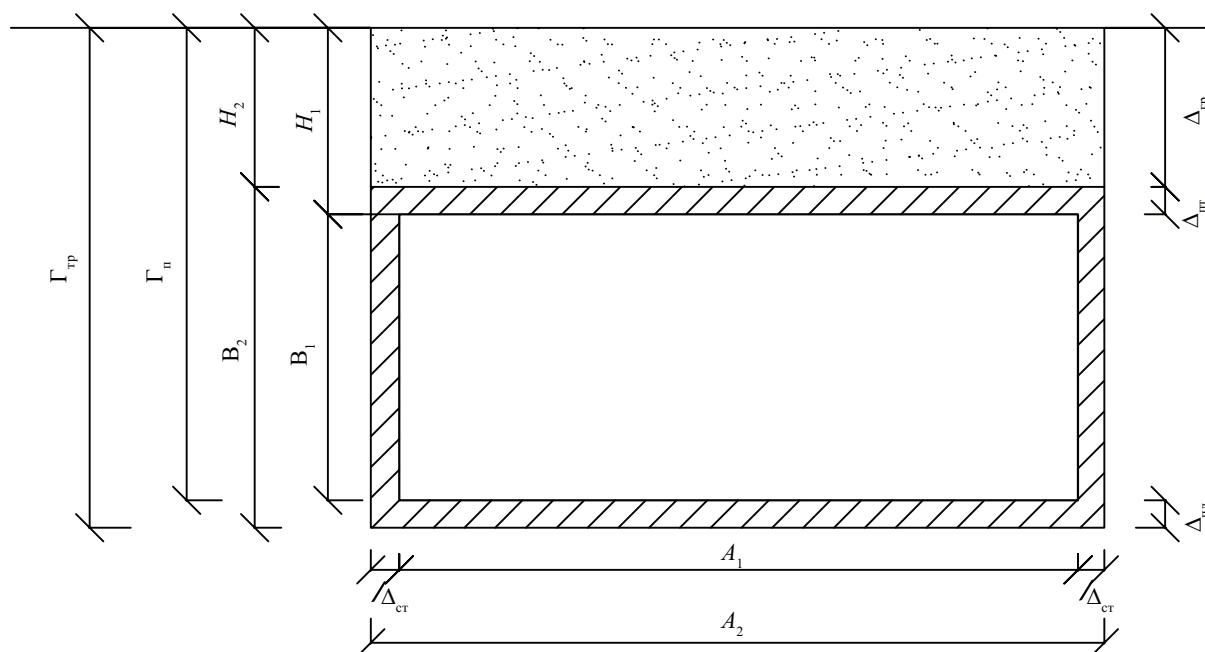


Рис. 1. Поперечный разрез характерной станции метрополитена: Γ_n — глубина заложения от уровня земли до уровня пола; $\Gamma_{тр}$ — глубина траншеи; H_1 — расстояние от уровня земли до потолка; H_2 — глубина засыпки грунтом; B_1 — высота от пола до потолка; B_2 — высота строения; A_1, A_2 — ширина; $V_{от}$ — отапливаемый объем

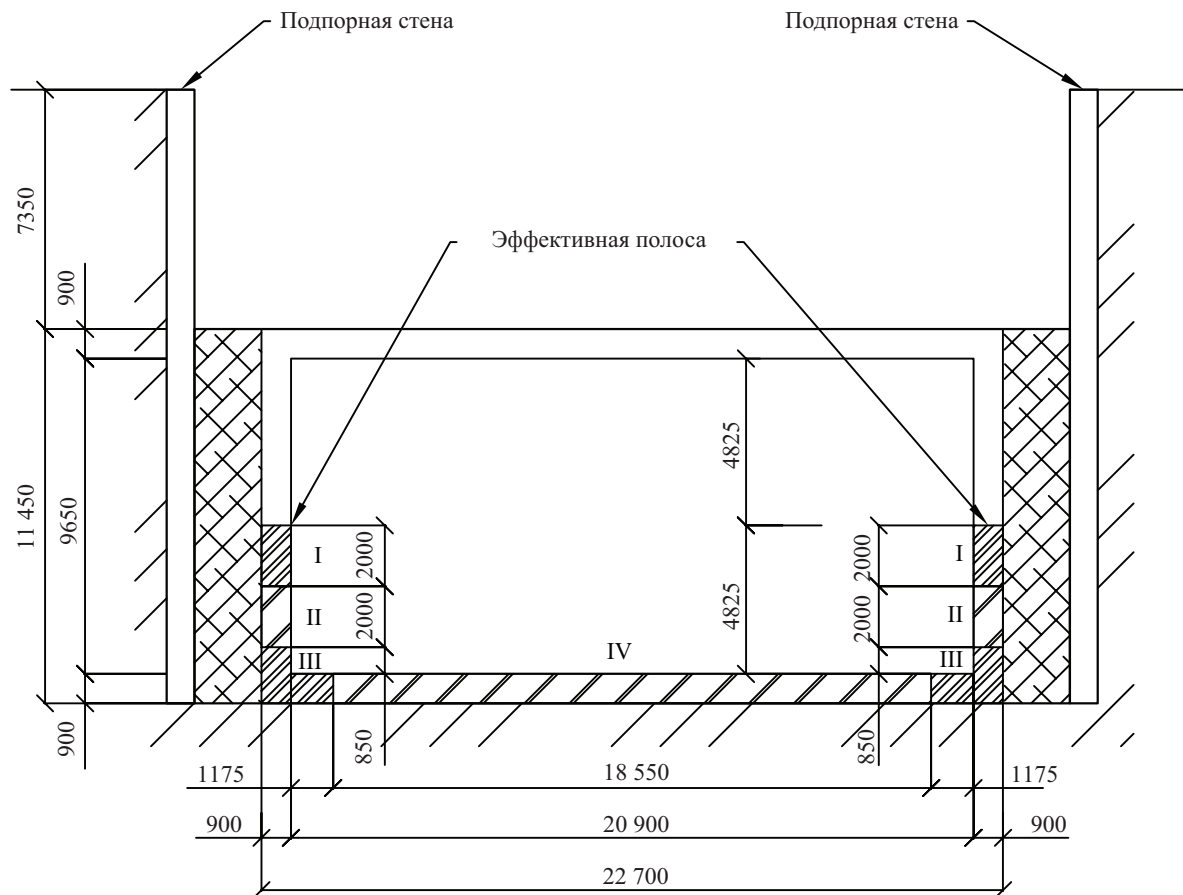


Рис. 2. Поперечный разрез характерной станции метрополитена, выполняемой открытым способом работ без обратной засыпки

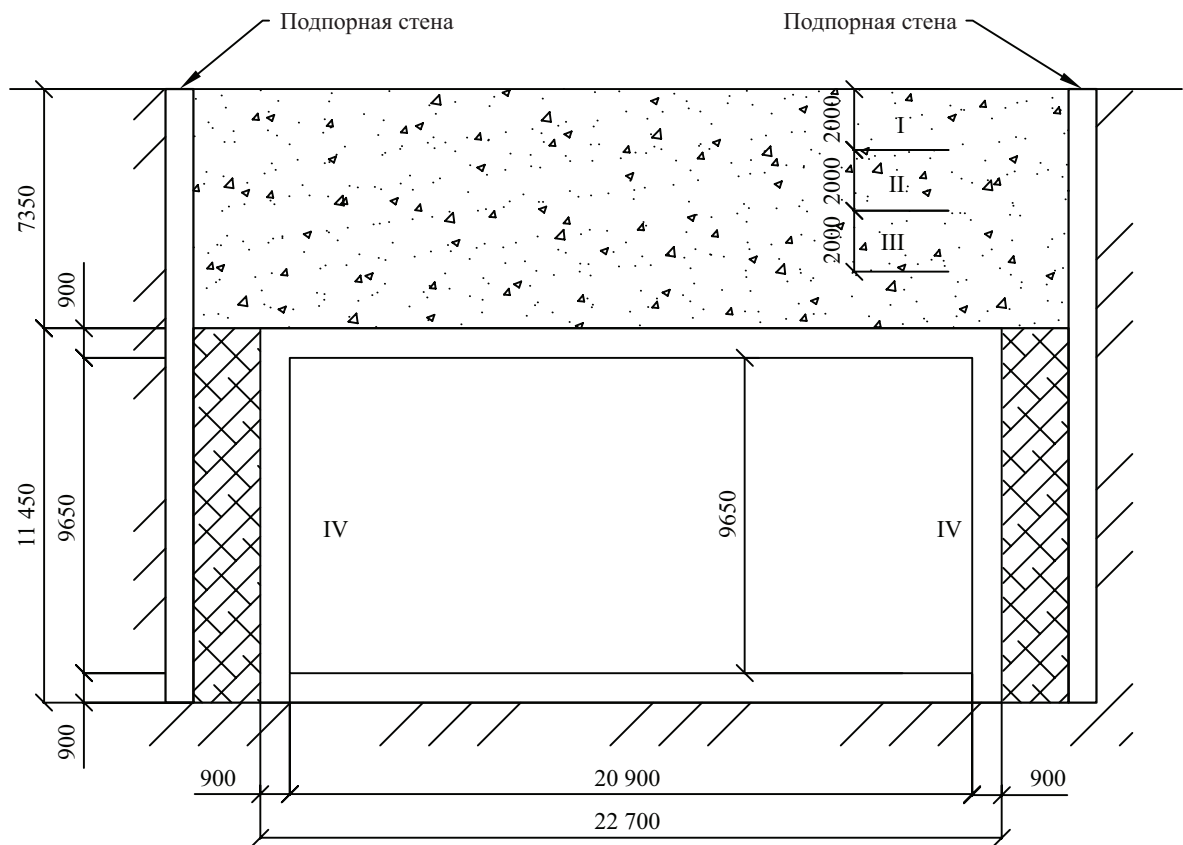


Рис. 3. Поперечный разрез характерной станции метрополитена, выполняемой открытым способом работ с обратной засыпкой

Табл. 1. Трансмиссионные теплотери станции метрополитена с открытым способом работ без обратной засыпки

Тип ограждения	$R, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$A, \text{м}^2$	$A/R, \text{Вт}/\text{м}^2$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{тр}}, \text{Вт}$
Покрытие	0,44	20,9	47,5	14,7	698,25
<i>Стена в грунте</i>					
1-я зона	1,05	4	3,81	14,7	56,00
2-я зона	1,9	4	2,1	14,7	30,95
3-я зона	2,6	4	1,54	14,7	22,62
4-я зона	3,85	7,3	1,9	14,7	27,87
<i>Пол по грунту</i>					
1-я зона	2,1	4	1,9	14,7	28,00
2-я зона	3,8	4	1,05	14,7	15,47
3-я зона	5,2	4	0,77	14,7	11,31
4-я зона	7,7	18,55	2,4	14,7	35,41
Итого	–	–	–	–	$\Sigma 925,88$
Удельная характеристика	$q_0 = \Sigma Q/V$				$q_0 = 4,59 \text{ Вт}/\text{м}^3$

Табл. 2. Трансмиссионные теплотери станции метрополитена с открытым способом работ с обратной засыпкой

Тип ограждения	$R, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$A, \text{м}^2$	$A/R, \text{Вт}/\text{м}^2$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{тр}}, \text{Вт}$
Покрытие	13,11	20,9	2,9	14,7	23,59
<i>Стена в грунте</i>					
1-я зона	1,05	0	0	14,7	0
2-я зона	1,9	0	0	14,7	0
3-я зона	2,6	0	0	14,7	0
4-я зона	3,85	40,2	10,44	14,7	153,49
<i>Пол по грунту</i>					
1-я зона	2,1	4	1,9	14,7	28,00
2-я зона	3,8	4	1,05	14,7	15,47
3-я зона	5,2	4	0,77	14,7	11,31
4-я зона	7,7	26,8	3,48	14,7	51,16
Итого	–	–	–	–	$\Sigma 283,02$
Удельная характеристика	$q_{100} = \Sigma Q/V$				$q_{100} = 1,4 \text{ Вт}/\text{м}^3$

Количество поступающего воздуха в объем сооружения метрополитена, строящегося открытым способом, остается относительно постоянной величиной. Кратность воздухообмена — санитарный показатель состояния воздушной массы в помещении. От этого параметра зависит безопасность и комфорт людей. Допустимые значения регулируются в сводах правил (СП), санитарных правилах и нормах (СанПиН) и ГОСТах. На основании аэродинамических характеристик вентиляторов, принятых на стадии строительно-монтажных работ, средняя величина суммарного расхода воздуха ($L, \text{м}^3/\text{ч}$) при напоре $P = 2600 \text{ Па}$ составляет $L = 6 \text{ м}^3/\text{с} = 21\,600 \text{ м}^3/\text{ч}$. Предусматриваются два вентилятора для организации общего воздухообмена станции, следовательно, расход приточного воздуха удваивается $L = 21\,600 \cdot 2 = 43\,200 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Усредненный объем станций метрополитена на первом этапе строительства, возводимых открытым способом в г. Москве, составляет $V = 54\,145 \text{ м}^3$. Величина кратности воздухообмена определяется как:

$$k_1 = \frac{L}{V} = \frac{43\,200}{54\,145} = 0,8 \text{ ч}^{-1}. \tag{2}$$

Усредненный объем станций метрополитена на втором этапе строительства, возводимых открытым способом работ, в г. Москве составляет $V = 81\,285 \text{ м}^3$. При этом кратность воздухообмена определяется следующим образом:

$$k_2 = \frac{L}{V} = \frac{43\,200}{81\,285} = 0,53 \text{ ч}^{-1}. \tag{3}$$

Значение средней величины кратности воздухообмена станции метрополитена, возводимой открытым способом, определяется как среднеариф-

метическая величина кратности воздухообменов первого и второго этапов строительства:

k_cp = (k_1 + k_2) / 2 = (0,8 + 0,53) / 2 = 0,66 ч^-1. (4)

Количество теплоты, необходимое для нагрева вентиляционного (инфильтрационного) воздуха, рассчитывается так:

Q = (1,2 * C / 3600) * L_0,66 * Delta t, кВт, (5)

где C = 1,005 кДж/(кг·°C) — теплоемкость воздуха; L_0,66 = 133,06 м³/ч — расход воздуха для кратности 0,66 1/ч; Delta t = t_вн - t_нар = 12 - (-2,7) = 14,7 °C — разница температур между средней температурой наружного воздуха отопительного периода t_н и температурой внутреннего воздуха t_вн.

Результаты расчета вентиляционных (инфильтрационных) теплотер станций метрополитена, возводимых открытым способом, представлены в табл. 3.

Тепловая мощность на нагрев вносимых материалов на станцию метрополитена определяется по формуле:

Q = (m * c_p * (t_1 - t_2)) / tau, кВт, (6)

где m — масса вносимого материала, кг; c_p — массовая теплоемкость вносимого материала, Дж/(кг·K); индекс «1» — начальная температура материала; индекс «2» — конечная температура материала; tau — время нагрева материала, с.

В табл. 4 приведены приблизительные массы основных строительных материалов, заносимых на станцию метрополитена, строящуюся открытым способом, в течение 24 часов.

Табл. 4. Материалы, заносимые на строящуюся станцию метрополитена в течение 24 часов

Материал	Масса, кг	Массовая теплоемкость материала, Дж/(кг·°C)	Время нагрева до температуры внутреннего воздуха, ч	Тепловая мощность на нагрев материала, Вт
Цементно-песчаный раствор	20 000	840	24	2761
Сталь	15 000	482	24	1188
Итого	35 000	—	—	3949

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Удельные величины расхода тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне сооружений станции метрополитена, выполняемой открытым способом, представлены в табл. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованы конструктивные элементы характерного сооружения метрополитена, сооружаемого открытым способом.

Табл. 3. Вентиляционные (инфильтрационные) теплотер станции метрополитена, возводимой открытым способом

Параметр	Значение
Условная кратность воздухообмена k_p, 1/ч	0,66
Расход приточного воздуха L_пр, м³/ч	133,06
Расчетная плотность воздуха rho_вн, кг/м³	1,2
Массовая теплоемкость воздуха C, кДж/(кг·K)	1,005
Коэффициент теплоутилизации вентиляционных установок K_v, б/р	1,00
Температура наружного воздуха t_n, °C	-2,7
Температура внутреннего воздуха t_v, °C	12,0
Вентиляционные теплотер Q_вент, Вт	655,23
Удельная тепловая характеристика q, Вт/м³	3,25

Определены значения удельной тепловой характеристики станций метрополитена, сооружаемых открытым способом, в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений, состава наружных ограждений, а также стадии завершения строительства (в том числе наличия или отсутствия обратной засыпки).

Предложены нормы на отопление от временных источников (количество тепловой энергии) станций метрополитена, возводимых открытым способом, в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений, а также заданных параметров воздуха.

Табл. 5. Расход тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне станций метрополитена, возводимых открытым способом

Параметр	Вт/м³	Гкал/(1000 м³·мес)
Трансмиссионные теплотер	3	1,86
Теплотер на нагрев вносимых материалов	0,0025	0,00186
Вентиляционные теплотер	3,25	2,01
Итого	6,25	3,87

Определены тепловые затраты на обеспечение заданных параметров воздуха для производства внутри сооружений строительных и монтажных работ в течение отопительного периода, отнесенные к единице объема.

Сравнительный анализ результатов предварительного расчета в нестационарном и стационарном

режимах показал достаточно высокую корреляцию удельных характеристик.

Представлены нормы расхода тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне сооружений метрополитена, сооружаемых открытым способом, в Гкал/1000 м³ в месяц (3,87 Гкал/1000 м³·мес).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сорокин А.Ю., Удод С.А., Митина Н.С., Копалина Т.В. Определение давления грунта при оценке показателя защищенности подземных сооружений типа метро к воздействию воздушной ударной волны // Научные труды Центрального научно-исследовательского института русского жестового языка. 2019. № 2. С. 185–194. EDN JOJKCT.
2. Петунина Д.С. Актуальные проблемы нормирования геотехнического мониторинга объектов ОАО «РЖД» на строительстве метро // Метро и тоннели. 2021. № 3. С. 22–25. EDN OQVRWM.
3. Кандела М., Горлье Л., Бертелло К., Роза Л. Зеленая линия метро в Тель-Авиве. Проектирование подземных станций метро в PLAXIS 2D // Геоинфо. 2022. № 1. С. 16–25. EDN AXDTSR.
4. Падерина Т.В., Яковлев В.В. Применение глубинных трехкоординатных датчиков наклона при решении задач геотехнического мониторинга наклонного хода метро // Навигация и управление движением : мат. XV конф. молодых ученых. 2013. С. 422–427. EDN RVYGTR.
5. Лавренко С.А., Королев И.А. Исследование процесса разрушения кембрийских глин резанием при проходке выработок метро Санкт-Петербурга // Горный журнал. 2018. № 2. С. 53–58. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.08. EDN YWMTTE.
6. Шилова Л.А., Евтушенко С.И., Улесикова Е.С., Кучумов М.А. Информационное моделирование тоннеля метро с противовибрационными мероприятиями // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 10 (100). С. 29–35. EDN KAKHFS.
7. Лай Ц., Нью Ф., Ван К., Чэнь Ц., Цю Ц., Фань Х. и др. Воздействие вибраций, вызванных работой метро, на Колокольную башню в Сиане (Китай) // Геоинфо. 2022. Т. 4. № 12. С. 56–72. EDN WXXJQS.
8. Анисимов В.М. Влияние буровзрывных работ при строительстве метро на основные несущие конструкции здания цирка // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 4. С. 68–72. EDN KVODQF.
9. Агуленко Н.И., Лакетко И.А. Разработка имитационной модели для оценки пассажиропотока проектируемой станции метро // Политранспортные системы : мат. X Междунар. науч.-техн. конф. 2019. С. 412–416. EDN GWQECV.
10. Антонова В.М., Гречишкина Н.А., Кузнецов Н.А. Анализ результатов моделирования пассажиропотока станции метро в программе AnyLogic // Информационные процессы. 2018. Т. 18. № 1. С. 35–39. EDN YTZVRH.
11. Смирнов Д.С., Рахимов Р.З., Габидуллин М.Г., Каюмов Р.А., Стоянов О.В. Испытания и прогнозная оценка долговечности уплотнительной резины герметизирующих стыков блоков обделки метро // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 15. С. 141–146. EDN STICWZ.
12. Картузов Д.В., Шилин А.А., Гапонов В.В., Каркешкин М.Л. Противоаварийные работы по укреплению купола вестибюля станции метро «Бауманская» в Москве // Научные тр. Общества железобетонщиков Сибири и Урала : мат. XIV-й Сибирской (междунар.) конф. по железобетону. 2016. С. 32–38. EDN VSPRKD.
13. Носов В.К. Оценка состояния тубинговой крепи эскалаторного тоннеля станции метро «Адмиралтейская» по результатам лазерно-сканирующей съемки // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 249–252. EDN QLIGJT.
14. Григорова В.О., Парамонов М.А. Строительство новых метро. Сравнение метро в разных странах // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки : мат. VI Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. 125-летию РУТ (МИИТ) 2021. С. 560–562. EDN RSQWHP.
15. Хуснуллин М.Ш. Перспективы развития Московского метро // Метро и тоннели. 2013. № 2. С. 8–9. EDN UHOPVR.
16. Хабибуллина Л.Д., Курбанов И.И., Гайсин А.М. Исторические особенности строительства тоннелей и метро // Мат. 72-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. 2021. Т. 2. С. 246. EDN ALLSKI.
17. Ермолаев С.Е. Альтернатива строительства станции «Суворовская» Кольцевой линии метро в Москве // Метро и тоннели. 2021. № 2. С. 36–37. EDN GSNKJR.
18. В Москве одобрен проект новой линии метро от «Шелепихи» до «Строгино» // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 2 (81). С. 197. EDN AOJXZD.
19. Саргсян С.В. Воздухораспределение в метро // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2011. № 8 (116). С. 70–71. EDN RHWBQL.

20. Мухамедкалиева Н.А., Бегимбетова А.С. Оценка влияния тоннельной вентиляции и поршневого эффекта поездов на качество воздуха на перегонах и станции метро // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. 2021. № 2 (53). С. 35–45. DOI: 10.51775/1999-9801_2021_53_2_35. EDN AZSJSR.

21. Бурлаков Д.Д., Федотова В.П., Скопничева О.В. Исследование влияния поршневого движения поездов метрополитена на обеспеченность воздухом станций метро // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S17. С. 28–36. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-6-17-28-36. EDN BPZLIS.

22. Бойцов Д.А. Объемно-планировочные решения станций метрополитена Москвы мелкого заложения в сочетании с двухпутными перегонными тоннелями // Метро и тоннели. 2021. № 2. С. 24–27. EDN ZHSUGJ.

23. Михайлов А.П., Гучёк Р.Л. О строительстве станционного комплекса В05 фиолетовой (четвертой) линии Бакинского метрополитена полузакрытым способом под защитой экрана из труб, выполненных методом микротоннелирования // Метро и тоннели. 2019. № 1. С. 22–24. EDN TCXTWM.

24. Ледяев А.П., Бойцов Д.А., Ледяева Н.Я. Теоретическое обоснование компоновочных решений станционных комплексов метрополитена средней глубины заложения (до 40 м) в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 3. С. 5. EDN QVMOFR.

25. Бычков Н.Н., Дорман И.Я., Елгаев С.Г., Мазеин С.В., Меркин В.Е., Мутушев М.А. Научно-техническое сопровождение проектирования и строительства подземных сооружений как фактор обеспечения единой научно-технической политики // Метро и тоннели. 2015. № 1. С. 18–19. EDN UBYANH.

Поступила в редакцию 21 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 12 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 12 июня 2023 г.

Об авторах: **Самвел Володяевич Саргсян** — кандидат технических наук, доцент, директор Научно-образовательного центра «Теплогазоснабжение и вентиляция»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 6685-7652; SargsyanSV@mgso.ru;

Сергей Валерьевич Мазеин — доктор технических наук, заместитель руководителя Исполнительной дирекции; **Тоннельная ассоциация России (ТАР)**; 107078, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 16/11; РИНЦ ID: 647998, Scopus: 55382601000; maz-bubn@mail.ru.

Вклад авторов:

Саргсян С.В. — научное руководство, концепция исследования, вычисления и аналитика.

Мазеин С.В. — написание исходного текста, итоговые выводы, вычисления, рецензирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

During construction of metro facilities taking into account construction schedule, execution of architectural and finishing and installation works starts before completion of works on basic structures and in the absence of connection to the permanent heat supply networks, which requires application of temporary heat sources (heat generators or electric air heaters) during the cold period. Obtaining the specific value of heat energy consumption for temporary heating of metro stations, construction of which is carried out by the open method, will allow to promptly determine the value of heat energy consumption of metro stations completed in the outline.

The topic of underground construction, despite the high level of responsibility and complexity of structures, is presented in domestic periodicals rather modestly. The greatest number of publications is devoted to geotechnical issues [1–5] and some applied problems, such as vibration counteraction [6] and impact on build-

ing development [7, 8]. A number of works reveal issues related to passenger flow optimization [9, 10], to solving application problems [11–13], as well as some aspects of non-technical nature [14–18]. Few works are devoted to the area of heat and gas supply and ventilation, which deals with the issues of air exchange in stations [19–21].

The aim of the study is to determine the specific value of heat consumption for heating underground stations, which are constructed by the open method, depending on different outdoor temperatures, construction completion, station depth, as well as the construction volume of the station.

Objectives:

- the study of the structural elements of underground stations constructed by the open-pit method;
- determination of transmission heat losses and costs for heating of infiltration (ventilation) air depending on the technical condition of the elements of the outer building envelopes of metro stations, which are constructed using the open air method;

- the heating system performance is based on the heat consumption for heating the ventilation (infiltrating) air;
- determination of the specific thermal performance of a metro station, depending on the adopted classification and given air parameters, by a statistical-analytical method;
- calculations of transmission heat flows using mathematical modelling;
- identification of values of specific thermal performance of metro stations constructed by open-cut method depending on space planning and construction solutions, as well as composition of external envelope structures, stage of construction completion (including presence or absence of backfill) and construction volume of the object;
- definition of temporary heating norms (amount of heat and electric energy) for metro stations from temporary heating sources, depending on space-planning and construction solutions and given air parameters;
- the heating energy consumption for indoor air for construction and installation work during the heating period from 10 October to 10 April per unit of building volume.

Underground stations are subdivided into elevated, above-ground, and underground according to their location relative to ground level. Underground station complexes can be constructed by open-cut method in excavations [22], by semi-enclosed method without opening the day surface of the ground [23], by closed works method [24].

Within the framework of scientific and technical support of design and construction of the Moscow Metro [25] at the site “Eastern section of the Third interchange circuit «Kashirskaya» station – «Karacharovo» station” included determination of the standard value for temporary heating from temporary sources of heat supply of the completed underground stations, construction of which is carried out by open method.

MATERIALS AND METHODS

The structural elements of underground stations constructed by open-cut method are divided into four groups: covering — top slab of underground station; walls; floor on the ground; columns. The main construction material is reinforced concrete. Calculation of heat loss through the enclosing structures (walls and floor) in the ground is carried out in accordance with the regulatory literature [1]. The thermal conductivity of the ground λ_{gr} bordering the underground station foundation is assumed to be 1.6 W/(m·K) (the basic design thermal conductivity of the ground). Determination of values of transmission and infiltration (ventilation) heat losses is performed for a typical metro station selected on the basis of generalized architectural data of designed and operating metro stations. Fig. 1 shows a cross section of a typical metro station.

A cross section of a typical open-cut underground station without backfill is shown in Fig. 2. Fig. 3 is a cross section of a typical open-cut and backfilled underground station.

Calculation of the values of transmission heat losses observed during the first stage of construction in the cold period, during architectural and finishing and installation

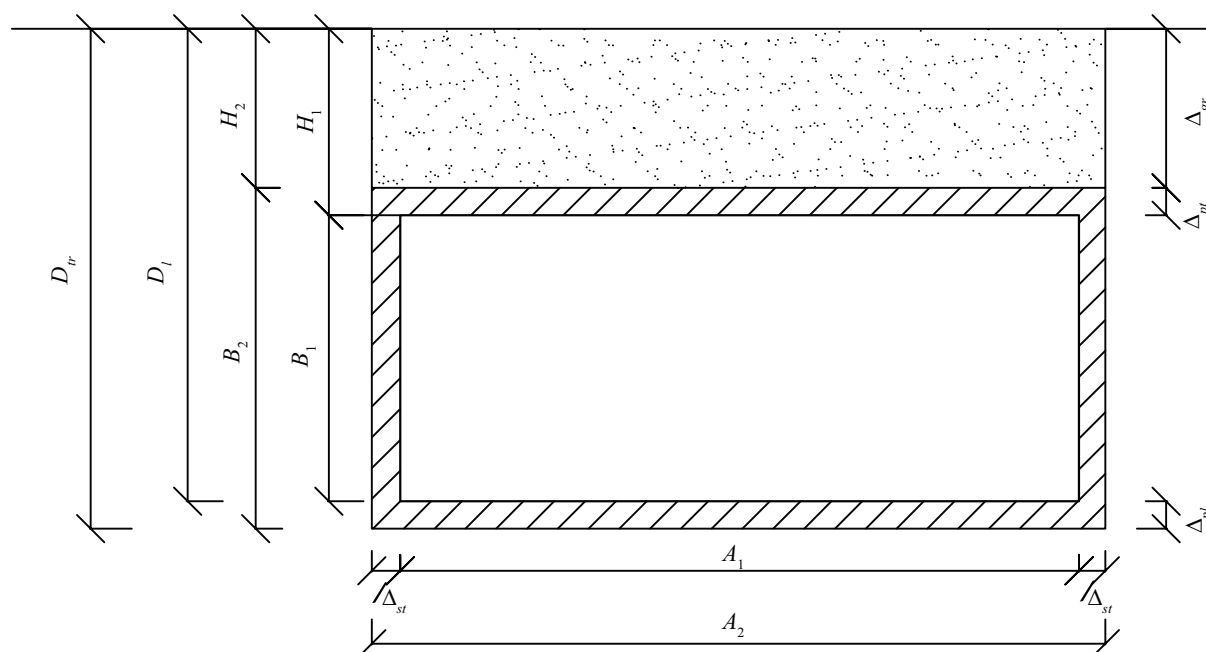


Fig. 1. Cross-section of a characteristic metro station: D_l — depth of embedment from ground level to floor level; D_{tr} — depth of trench; H_1 — distance from ground level to ceiling; H_2 — depth of ground backfill; B_1 — height from floor to ceiling; B_2 — height of structure; A_1, A_2 — width; V_{hv} — heated volume

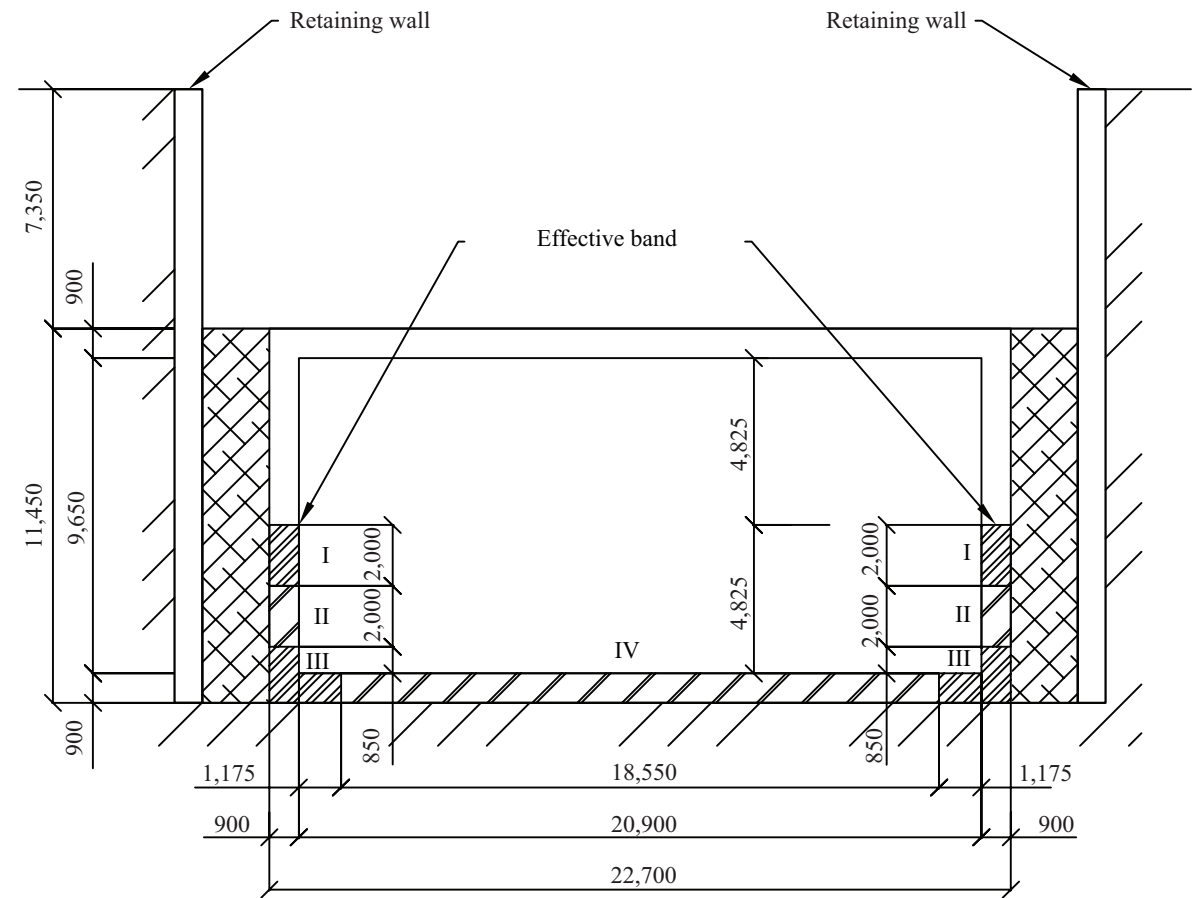


Fig. 2. Cross-section of a characteristic underground station performed by open-cut method without backfill

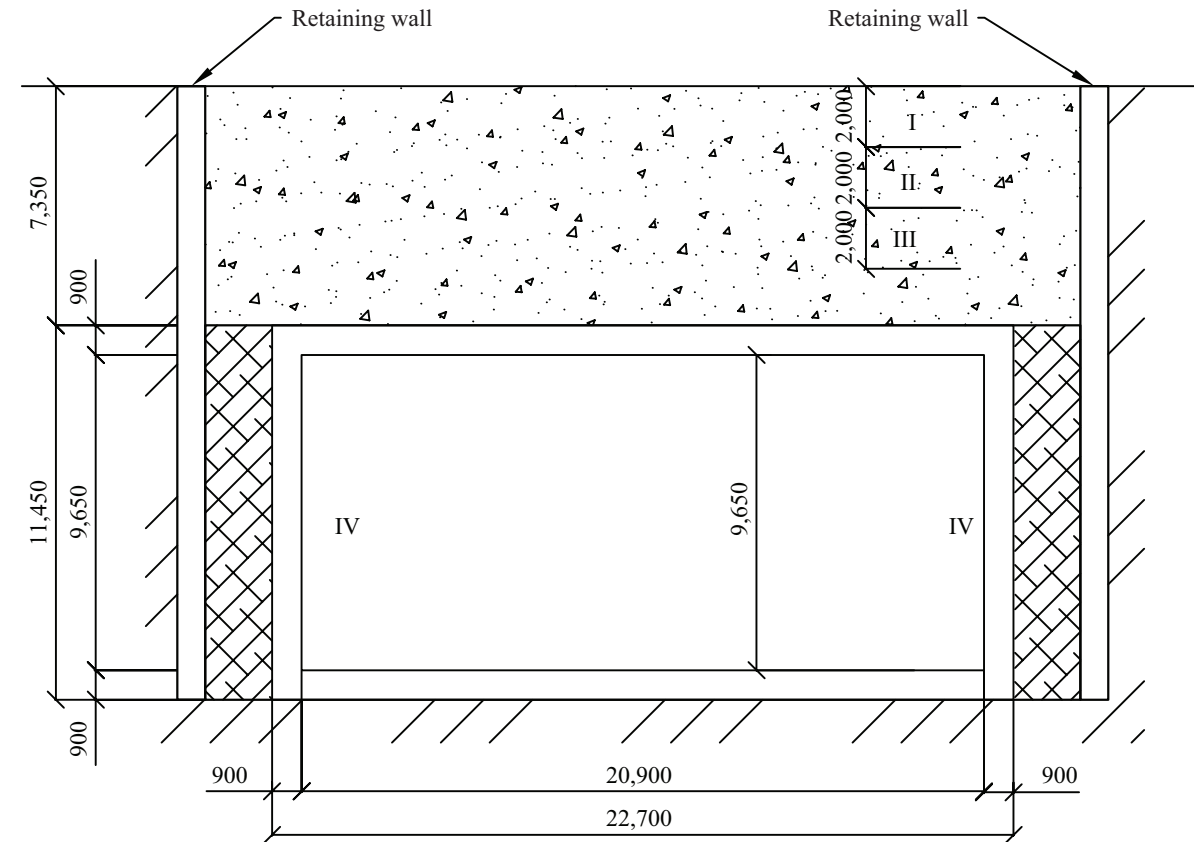


Fig. 3. Cross-section of a characteristic underground station performed by open-cut backfill method

works of the end of the 2nd and beginning of the 3rd year (Fig. 2) in the constructed premises of the metro station with open method without backfilling is presented in Table 1. A similar calculation for the second stage of construction in the cold period during architectural and installation works of the end of the 2nd and beginning of the 3rd year (Fig. 3), but with backfill, is given in Table 2. Based on the transmission heat loss calculations performed, the value of the average specific heat characteristic of the plant was determined:

$$q_{mid} = (q_0 + q_{100}) / 2 = (4.59 + 1.4) = 2.995 \text{ W/m}^3. \quad (1)$$

To calculate ventilation (infiltration) heat loss, the hourly rate of incoming outside air into an open-circuit metro station under construction should be determined. Ventilation air enters the station through periodically opening doors, gates, openings and gaps

in external envelopes. Through the air-permeable structures (awnings constructed along the end sections of the station) air enters by infiltration. From the analysis of a large number of stations, it is concluded that regardless of the station volume, the areas of technical openings, periodically opening doors, and areas of air-permeable structures (tent structures) remain relatively constant values.

The amount of air entering the volume of an open-plan underground structure remains a relatively constant value. The air exchange rate is a sanitary indicator of the condition of the indoor air mass. The safety and comfort of people depends on this parameter. The admissible values are regulated in regulations, sanitary rules and standards (SanPiN) and GOSTs. Based on the aerodynamic characteristics of fans adopted at the stage of construction works, the average value of total air flow (L , m^3/h) at the head of $P = 2,600$ Pa is

Table 1. Transmission heat losses of an underground station with open-pit method without backfill

Fence type	$R, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	A, m^2	$A/R, \text{W}/\text{m}^2$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Q_{hp}, W
Coverage	0.44	20.9	47.5	14.7	698.25
<i>A wall in the ground</i>					
1 zone	1.05	4	3.81	14.7	56.00
2 zone	1.9	4	2.1	14.7	30.95
3 zone	2.6	4	1.54	14.7	22.62
4 zone	3.85	7.3	1.9	14.7	27.87
<i>Ground floor</i>					
1 zone	2.1	4	1.9	14.7	28.00
2 zone	3.8	4	1.05	14.7	15.47
3 zone	5.2	4	0.77	14.7	11.31
4 zone	7.7	18.55	2.4	14.7	35.41
Total	—	—	—	—	$\Sigma 925.88$
Specific characteristic	$q_0 = \Sigma Q/V$				$q_0 = 4.59 \text{ W}/\text{m}^3$

Table 2. Transmission heat losses of an underground station with open backfill method

Fence type	$R, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	A, m^2	$A/R, \text{W}/\text{m}^2$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Q_{hp}, W
Coverage	13.11	20.9	2.9	14.7	23.59
<i>A wall in the ground</i>					
1 zone	1.05	0	0	14.7	0
2 zone	1.9	0	0	14.7	0
3 zone	2.6	0	0	14.7	0
4 zone	3.85	40.2	10.44	14.7	153.49
<i>Ground floor</i>					
1 zone	2.1	4	1.9	14.7	28.00
2 zone	3.8	4	1.05	14.7	15.47
3 zone	5.2	4	0.77	14.7	11.31
4 zone	7.7	26.8	3.48	14.7	51.16
Total	—	—	—	—	$\Sigma 283.02$
Specific characteristic	$q_{100} = \Sigma Q/V$				$q_{100} = 1.4 \text{ W}/\text{m}^3$

$L = 6 \text{ m}^3/\text{s} = 21,600 \text{ m}^3/\text{h}$. Two fans are envisaged for a total air exchange of the plant, so the supply air flow rate is doubled to $L = 21,600 \cdot 2 = 43,200 \text{ m}^3/\text{h}$.

The average volume of underground stations in the first phase of open-cut construction in Moscow is $V = 54,145 \text{ m}^3$. The air exchange ratio is defined as:

$$k_1 = \frac{L}{V} = \frac{43,400}{54,145} = 0.8 \text{ hour}^{-1}. \tag{2}$$

The average volume of open-cut underground stations in Moscow during the second construction phase is $V = 81,285 \text{ m}^3$. The air exchange rate is determined as follows:

$$k_2 = \frac{L}{V} = \frac{43,200}{81,285} = 0.53 \text{ hour}^{-1}. \tag{3}$$

The average air exchange rate for an open-plan underground station is determined as the arithmetic mean of the air exchange rates of the first and second construction phases:

$$k_{mid} = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{0.8 + 0.53}{2} = 0.66 \text{ hour}^{-1}. \tag{4}$$

Table 3. Ventilation (infiltration) heat loss of an open-cut metro station

Parameter	Value
Conditional air exchange ratio k_p , 1/h	0.66
Supply air flow L_{sa} , m^3/h	133.06
Calculated air density ρ_{in} , kg/m^3	1.2
Mass heat capacity of air C , $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	1.005
Air handling unit heat recovery coefficient C_e , w/r	1.00
Outdoor temperature t_{out} , $^{\circ}\text{C}$	-2.7
Internal air temperature t_{in} , $^{\circ}\text{C}$	12.0
Ventilation heat loss Q_{vent} , W	655.23
Specific heat characteristic q , W/m^3	3.25

The amount of heat required to heat the ventilation (infiltration) air is calculated as follows:

$$Q = \frac{1.2 \cdot C}{3,600} L_{0.66} \cdot \Delta t, \text{ kW}, \tag{5}$$

where $C = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ — heat capacity of air; $L_{0.66} = 133.06 \text{ m}^3/\text{h}$ — air flow rate for the ratio of 0.66 1/h; $\Delta t = t_{in} - t_{out} = 12 - (-2.7) = 14.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ — temperature difference between the average outside temperature of the heating period t_{out} and the inside temperature t_{in} .

The results of calculation of ventilation (infiltration) heat losses of open-cut underground stations are presented in Table 3.

The heat capacity for heating the inputs to the underground station is determined by the formula:

$$Q = \frac{m \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2)}{\tau}, \text{ kW}, \tag{6}$$

where: m — mass of material to be introduced, kg; c_p — mass heat capacity of material to be introduced, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; index “1” — initial material temperature; index “2” — final material temperature; τ — time of material heating, s.

Table 4 shows the approximate weights of the main construction materials brought into an open-cut underground station over a 24-hour period.

RESEARCH RESULTS

Specific values of heat energy consumption for temporary heating of the completed structures of the open-cut underground station are presented in Table 5.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The structural elements of a characteristic open-cut underground structure are investigated.

The values of specific heat characteristic of open-cut metro stations depending on space-planning and

Table 4. Materials brought into the metro station under construction within 24 hours

Material from	Weight, kg	Mass heat capacity of material, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	Heating time to indoor temperature, h	Heat output for material heating, W
Cement-sand mortar	20,000	840	24	2,761
Steel	15,000	482	24	1,188
Total	35,000	—	—	3,949

Table 5. Heat consumption for temporary heating of open cut underground stations

Parameter	W/m^3	$\text{Gcal}/(1,000 \text{ m}/\text{month}^3)$
Transmission heat losses	3	1.86
Heat loss due to heating of input materials	0.0025	0.00186
Ventilation heat loss	3.25	2.01
Total	6.25	3.87

constructive solutions, composition of external envelopes and stage of construction completion (including presence or absence of backfill) are determined.

The norms for heating from temporary sources (amount of heat energy) of underground stations erected by the open method, depending on the space-planning and construction solutions, as well as specified air parameters, are proposed.

The thermal costs of providing the specified air parameters for construction and installation work

inside the buildings during the heating period, related to the unit volume, have been determined.

A comparative analysis of the pre-calculation results in non-stationary and stationary modes showed a sufficiently high correlation of the specific characteristics.

The norms of heat energy consumption for temporary heating of open-cut underground constructions completed in Gcal/1,000 m³ per month (3.87 Gcal/1,000 m³ month) are presented.

REFERENCES

1. Sorokin A.Yu., Udod S.A., Mitina N.S., Kopalina T.V. Determination of soil pressure in assessing the protection index of underground structures such as metro to the impact of an air shock wave. *Scientific works of the Central Research Institute of Russian Sign Language*. 2019; 2:185-194. EDN JOJKCT. (rus.).
2. Petunina D.S. Current problems of geotechnical monitoring rationing for Russian railways facilities on the subway construction. *Metro and Tunnels*. 2021; 3:22-25. EDN OQVRWM. (rus.).
3. Candela M., Gorlier L., Bertello K., Rosa L. The green metro line in Tel Aviv. Design of underground metro stations in PLAXIS 2D. *Geoinfo*. 2022; 1:16-25. EDN AXDTSR. (rus.).
4. Paderina T.V., Yakovlev V.V. The use of deep three-coordinate tilt sensors in solving problems of geotechnical monitoring of the inclined course of the metro. *Navigation and traffic control : materials of the XV conference of young scientists*. 2013; 422-427. EDN RVYGTR. (rus.).
5. Lavrenko S.A., Korolev I.A. Investigation of the process of destruction of Cambrian clays by cutting during the tunneling of St. Petersburg metro workings. *Mining Journal*. 2018; 2:53-58. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.08. EDN YWMTTE. (rus.).
6. Shilova L.A., Evtushenko S.I., Ulesikova E.S., Kuchumov M.A. Information modeling of a subway tunnel with anti-vibration measures. *Science and Business: Ways of Development*. 2019; 10(100):29-35. EDN KAKHFS. (rus.).
7. Lai J., Niu F., Wang K., Chen J., Qiu J., Fan H. et al. The impact of vibrations caused by the operation of the subway on the Bell Tower in Xi'an (China). *Geoinfo*. 2022; 4(12):56-72. EDN WXXJQS. (rus.).
8. Anisimov V.M. Influence of drilling and blasting operations during the construction of the metro on the main load-bearing structures of the circus building. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2007; 4:68-72. EDN KVODQF. (rus.).
9. Agulenko N.I., Laketko I.A. Development of a simulation model for assessing the passenger flow of the projected metro station. *Polytransport systems : materials of the X International scientific and technical conference*. 2019; 412-416. EDN GWQECV. (rus.).
10. Antonova V.M., Grechishkina N.A., Kuznetsov N.A. Analysis of the results of modeling the passenger flow of the metro station in the AnyLogic program. *Information Processes*. 2018; 18(1):35-39. EDN YTZVRH. (rus.).
11. Smirnov D.S., Rakhimov R.Z., Gabidullin M.G., Kayumov R.A., Stoyanov O.V. Tests and predictive assessment of the durability of sealing rubber sealing joints of subway lining blocks. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014; 17(15):141-146. EDN STICWZ. (rus.).
12. Kartuzov D.V., Shilin A.A., Gaponov V.V., Karkeshkin M.L. Emergency work to strengthen the dome of the vestibule of the Baumanskaya metro station in Moscow. *Scientific works of the Society of reinforced concrete workers of Siberia and the Urals : materials of the XIVth Siberian (international) conference on reinforced concrete*. 2016; 32-38. EDN VSPRKD. (rus.).
13. Nosov V.K. Assessment of the condition of the tubing support of the escalator tunnel of the metro station "Admiralteiskaya" based on the results of laser scanning survey. *Journal of Mining Institute*. 2012; 199:249-252. EDN QLIGJT. (rus.).
14. Grigорова V.O., Paramonov M.A. Construction of new subways. Comparison of the metro in different countries. *Current state, problems and prospects for the development of industry science : materials of the VI All-Russian Conference with international participation dedicated to the 125th anniversary of RUT (MIIT)*. 2021; 560-562. EDN RSQWHP. (rus.).
15. Khusnullin M.Sh. Prospects for the development of the Moscow metro. *Metro and Tunnels*. 2013; 2:8-9. EDN UHOPVR. (rus.).
16. Khabibullina L.D., Kurbanov I.I., Gaisin A.M. Historical features of the construction of tunnels and metro. *Proceedings of the 72nd scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists of USPTU*. 2021; 2:246. EDN ALLSKI. (rus.).
17. Ermolaev S.E. An alternative to the construction of the Suvorovskaya station of the Koltsevaya metro line in Moscow. *Metro and Tunnels*. 2021; 2:36-37. EDN GSNKJR. (rus.).

18. A project for a new metro line from Shel-epikha to Strogino was approved in Moscow. *World of Transport and Transportation*. 2019; 17(2):(81):197. EDN AOJXZD. (rus.).
19. Sargsyan S.V. Air distribution in the subway. *Plumbing, Heating, Air conditioning*. 2011; 8(116):70-71. EDN RHWBQL. (rus.).
20. Mukhamedkalieva N.A., Begimbetova A.S. Estimation of the influence of tunnel ventilation and piston effect of trains on air quality on the hacks and metro stations. *Bulletin of Almaty University of Energy and Communications*. 2021; 2(53):35-45. DOI: 10.51775/1999-9801_2021_53_2_35. EDN AZSJRS. (rus.).
21. Burlakov D.D., Fedotova V.P., Skopintseva O.V. Study of the effect of piston traffic of metropolitena trains on security by the air of metro stations. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2019; S17:28-36. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-6-17-28-36. EDN BPZLIS. (rus.).
22. Boytsov D.A. Space-planning solutions for the shallow-laying metro stations of Moscow in combination with the double-track tunnels between stations. *Metro and Tunnels*. 2021; 2:24-27. EDN ZHSUGJ. (rus.).
23. Mikhailov A.P., Guchok R.L. About the construction of the station complex b05 purple (fourth) line of the Baku subway using semi-closed method under the protection of pipe screen performed viamicrotunneling method. *Metro and Tunnels*. 2019; 1:22-24. EDN TCXTWM. (rus.).
24. Ledyayev A.P., Boytsov D.A., Ledyayeva N.Y. Theoretical substantiation of the layout decisions of station complexes of the underground of medium depth (up to 40 m) in the engineering and geological conditions of Saint Petersburg. *Transport Structures*. 2019; 6(3):5. EDN QBMOFR. (rus.).
25. Bychkov N.N., Dorman I.Ya., Elgaev S.G., Mazein S.V., Merkin V.E., Mutushev M.A. Scientific and technical support for the design and construction of underground structures as a factor in ensuring a unified scientific and technical policy. *Metro and Tunnels*. 2015; 1:18-19. EDN UBYAHH. (rus.).

Received March 21, 2023.

Adopted in revised form on June 12, 2023.

Approved for publication on June 12, 2023.

Bionotes: **Samvel V. Sarsyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center “Heat and Gas Supply and Ventilation”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 6685-7652; SargsyanSV@mgsu.ru;

Sergey V. Mazein — Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of the Executive Directorate; **Russian Tunneling Association (RTA)**; 16/11 Novoryazanskaya st., Moscow, 107078, Russian Federation; ID RSCI: 647998, Scopus: 55382601000; maz-bubn@mail.ru.

Contribution of the authors:

Samvel V. Sarsyan — scientific guidance, research concept, calculations and analytics.

Sergey V. Mazein — writing the source text, final conclusions, calculations, reviewing the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.