

УДК 550.82

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕПЛОЭКОНОМНОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ПОДЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА**Губеладзе О.А., Денисов О.В., Андреева Е.С.***ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону,
e-mail: buba26021966@yandex.ru, ovd63@mail.ru, espmeteo@yandex.ru*

Эффективность защиты оборудования станции метро от воздействий различной природы зависит не только от технической исправности, но и способности технических систем функционировать необходимое время в автономном режиме. Поддержание температурных параметров должно осуществляться с высоким показателем эффективности комплекса оптимальных инженерных решений, методов и средств рационального потребления энергии и использования возобновляемых её источников. В статье рассматривается возможность использования теплоаккумулирующей способности грунтового массива, окружающего линейный объект метрополитена глубокого заложения, для минимизации энергозатрат проектируемой системы технологического кондиционирования воздушной среды объекта. Дано обоснование принятых при разработке теоретической модели допущений. Анализ результатов расчета по разработанной модели показал, что при соответствующих геометрических размерах и теплофизических характеристиках материалов строительного сооружения и окружающей среды требуемый температурный режим в основном будет обеспечен за счёт теплоаккумулирующей способности железобетонной конструкции сооружения и прилегающего грунтового массива. Для достижения максимального эффекта необходимо работу технологического оборудования осуществлять в соответствии с алгоритмом функционирования (работа агрегатов в «горячем» режиме, который является предпочтительным с точки зрения эффективности, чередуется с работой в «холодном» режиме). Представлена циклограмма функционирования сооружения метрополитена в соответствии с данным алгоритмом для одного из расчётных случаев. Проведенные исследования различных по форме моделей подземных станций метрополитена, характеризующих основные строительные модули метрополитена, позволили подтвердить предположение о существовании локального минимума расчётной кривой изменения температуры на поверхности в результате действия теплового источника с учётом граничных условий второго и третьего рода со скачкообразным уменьшением энергопотребления.

Ключевые слова: температурно-влажностный режим, теплоаккумулирующая способность, источник тепловыделений, одноводчатая станция метрополитена глубокого заложения, энергетическая эффективность подземного сооружения

THE POSSIBILITY OF USING THE HEAT STORAGE CAPACITY OF THE SOIL BASE TO MAINTAIN THE HEAT-EFFICIENT MODE OF OPERATION OF LINEAR OBJECTS OF UNDERGROUND URBAN TRANSPORT**Gubeladze O.A., Denisov O.V., Andreeva E.S.***Don State Technical University, Rostov-on-Don,
e-mail: buba26021966@yandex.ru, ovd63@mail.ru, espmeteo@yandex.ru*

The effectiveness of the protection of the equipment of the metro station from the effects of different nature depends not only on the technical serviceability, but also the ability of technical systems to operate the necessary time in offline mode. Maintenance of temperature parameters should be carried out with a high indicator of efficiency of a complex of optimum engineering decisions, methods and means of rational consumption of energy saving and use of its renewable sources. The article considers the possibility of using the heat storage capacity of the soil mass surrounding the linear object of the underground deep-laid, to minimize the energy consumption of the projected system of technological air conditioning of the object. The substantiation of the assumptions adopted in the development of the theoretical model is given. Analysis of the calculation results by the developed model showed that with appropriate geometrical dimensions and thermophysical characteristics of materials of building structures and the environment required temperature mostly will be provided by the heat storage capacity of the reinforced concrete construction and the surrounding soil mass. To achieve maximum effect, it is necessary to operate the process equipment in accordance with the algorithm of operation (operation of the units in the «hot» mode, which is preferable from the point of view of efficiency, alternates with operation in the «cold» mode). A cyclogram of the functioning of the subway structure in accordance with this algorithm for one of the calculated cases is presented. The studies of various models of underground metro stations, characterizing the main building modules of the subway, allowed to confirm the assumption of the existence of a local minimum of the calculated curve of temperature change on the surface as a result of the action of a heat source, taking into account the boundary conditions of the second and third kind with an abrupt decrease in energy consumption.

Keywords: temperature-humidity regime, heat storage capacity, heat source, single-arch underground station of deep laying, energy efficiency of underground construction

Одноводчатые станции метрополитена, благодаря хорошим показателям по экономической эффективности, широко применяются на линиях зарубежных метрополитенов, а также на современных линиях Москвы и Санкт-Петербурга. Объёмно-пла-

нировочные решения станций предусматривают устройство кругового свода, опирающегося на массивные стены или замкнутой конструкции овального сечения из сборных блоков [1]. При этом такие станции метрополитена могут быть выполнены в едином строительном комплексе с двухпутным перегонным тоннелем, а также защитными устройствами гражданской обороны и дополнительной системой сооружений, что предъявляет особые требования к обеспечению тепловлажностного режима в этих подземных сооружениях [2].

Установлено, что эффективность защиты оборудования станции метро от воздействий различной природы зависит не только от технической исправности, но и способности технических систем функционировать необходимое время в автономном (аварийном) режиме, например без централизованного энергоснабжения, сохраняя при этом оптимальные для пассажиров, персонала и функциональных процессов оборудования температурные составляющие микроклимата [3, 4].

Поддержание температурных параметров должно осуществляться с высоким показателем эффективности комплекса оптимальных инженерных решений, методов и средств рационального потребления, экономии энергии и использования инновационных энергетических установок [5]. Источником тепловыделений на станции метро является работающее стационарное оборудование, подвижной транспорт и люди [6, 7]. Количество тепловыделений может меняться несколько раз в течение суток. Отклонения температуры от заданных уровней приводят к несоблюдению условий нормального функционирования систем. Для получения достоверных данных об изменении температуры воздушной среды внутри станции необходимо провести оценку теплоаккумулирующей способности окружающего массива.

Отсюда целью настоящего исследования является изыскание возможности использования теплоаккумулирующей способности грунтового массива, окружающего линейный объект метрополитена глубокого заложения, для минимизации энергозатрат проектируемой системы технологического кондиционирования воздушной среды объекта.

Материалы и методы исследования

Для реализации цели исследования были использованы известные математические

методы и модели, изложенные в ряде научных работ [8, 9]. Материалы, положенные в основу данной публикации, охватывают 1998–2018 гг. и научно-исследовательские Отчеты ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (НИР по теме: «Разработка фундаментальных основ методологии математического моделирования формирования опасных и вредных производственных факторов» ДГТУ, Государственный контракт № 7-5246, 50.51.15, 86.21.00.), ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» и НИТУ «МИСИС».

Результаты исследования и их обсуждение

В сложных случаях находить приближенные решения для любых тел произвольной формы позволяют численные методы, основанные на методах конечных разностей и конечных элементов [10, 11]. Однако основным недостатком численных методов являются ограниченные возможности для аналитических исследований данных моделей подземных сооружений метрополитена. Примем допущения:

1. Теплообмен с наружным атмосферным воздухом отсутствует в силу значительного термического сопротивления конструкции модели.

2. Одним из факторов, определяющих теплотери строительного сооружения станции, является температура грунта. Глубины проникновения суточных и годовых температурных волн связаны соотношением

$$\frac{l_{\text{год}}}{l_{\text{сут}}} = \sqrt{\frac{\tau_{\text{год}}}{\tau_{\text{сут}}}} = \sqrt{365} \approx 19. \quad (1)$$

Экспериментальные данные [2] показали, что колебания температуры, вызываемые нагреванием земной поверхности днём и охлаждением ночью, не влияют на температуру грунта уже на глубине 1 м. Расчетная температура грунта на глубине определяется по зависимости

$$T_r = T_{cp}^b + \Delta t + \frac{n}{30} \pm A_n, \quad (2)$$

где T_{cp}^b – среднегодовая температура воздуха; Δt – превышение среднегодовой температуры поверхности грунта над среднегодовой температурой воздуха; $n/30$ – геотермический фактор, учитывающий увеличение глубины; A_n – амплитуда сезонных колебаний температуры на глубине.

3. Слой гидроизоляции (при наличии) модели тоннеля метрополитена рассматриваем как тонкую оболочку в условиях медленных изменений температуры. Температура по всей толщине оболочки модели одинакова, количество тепла, аккумулированного единицей объема стенки в течение полупериода, определится как

$$(\Delta Q_v)_{2R \rightarrow 0} = 2T_M c \rho, \quad (3)$$

где T_M – амплитуда колебаний температуры воздуха в строительном комплексе метрополитена.

Таким образом, слой гидроизоляции принимаем «термически прозрачным», что не противоречит данным [3].

На рис. 1 представлена упрощенная схема строительной части сооружения. Потери тепла через верхнюю часть свода тоннеля и обратный свод пренебрегаем ввиду

их малости с учетом особенностей компоновки двухпутного тоннеля.

Суммарная мощность теплоизбытков, поглощаемых воздушной средой и окружающим массивом, определяется из выражения

$$Q = Q_{\text{возд}} + Q_{\text{масс}}. \quad (4)$$

В свою очередь

$$Q_{\text{возд}} = \frac{c_v \rho_v H \pi R^2 \Delta T_v}{\tau}, \quad (5)$$

где c_v – удельная теплоемкость воздуха;

ρ_v – удельная плотность;

H – высота единого строительного комплекса, в том числе с защитными устройствами гражданской обороны и дополнительной системой сооружений;

R – условный радиус перегонного тоннеля;

τ – время;

ΔT_v – разность температур.

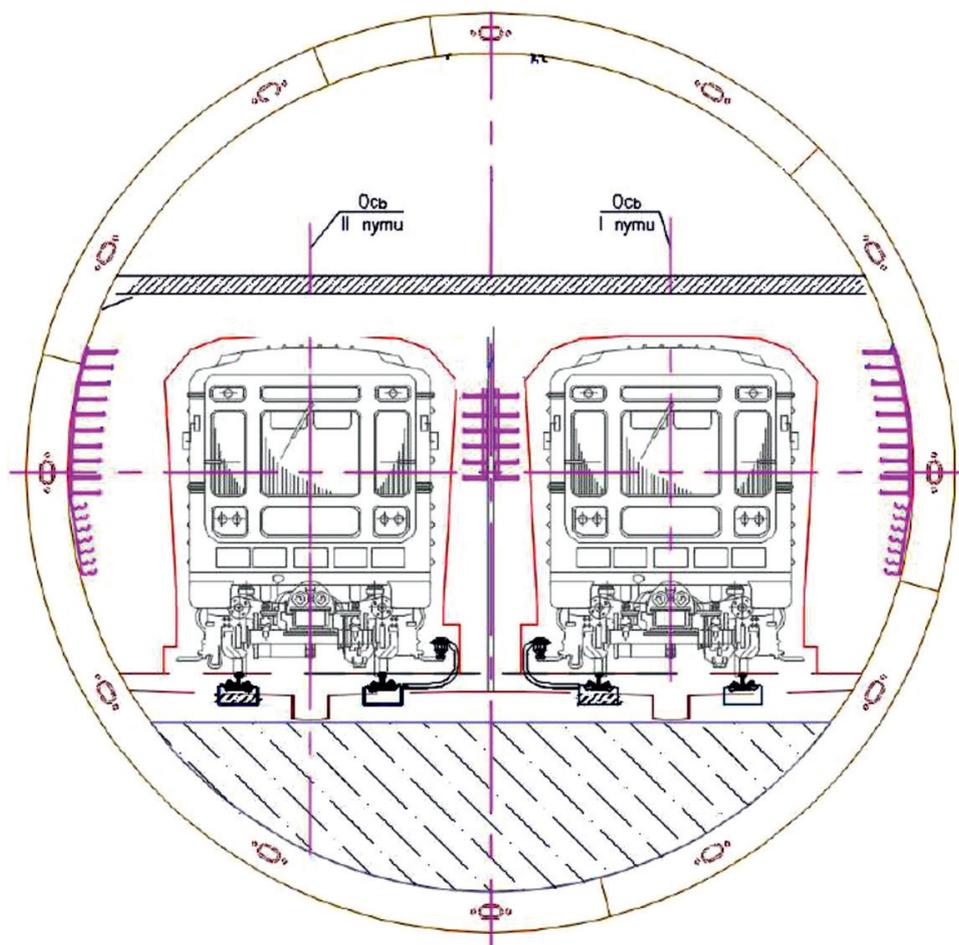


Рис. 1. Сечение двухпутного тоннеля метрополитена

Тепловыделения, поглощаемые массивом «бетон – грунт», для расчётной схемы (рис. 1) определяются по формуле

$$Q_{\text{масс}} = \Delta T_{\text{м}} \cdot k \cdot F_{\text{м}}, \quad (6)$$

где $\Delta T_{\text{м}}$ – разность температур стенки переронного тоннеля и массива;

$\alpha_{\text{м}}$ – температуропроводность массива;

α – коэффициент теплоотдачи между средой и стенкой;

$F_{\text{м}}$ – площадь поверхности массива;

$\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент теплопроводности:

$$k = \frac{\pi \cdot H \left(2R + \frac{2}{3} \sqrt{\tau \cdot \alpha_{\text{м}}} \right)}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\sqrt{\tau \cdot \alpha_{\text{м}}}}{\lambda_{\text{м}}}}. \quad (7)$$

С учётом того, что массив по сравнению с сечением сооружения неизмеримо велик, можно считать, что все тепловыделения из «отапливаемого» центрального распределительного зала в итоге будут поглощены грунтом. Однако это не будет происходить мгновенно, а температура воздушной среды отличается от температуры стенки массива на величину:

$$\Delta t = \left(\frac{Q}{1,66 \cdot F_{\text{м}}} \right)^{0,75}. \quad (8)$$

Подставляя (2) и (3) с учетом (4) в (1), получим формулу для определения изменения температуры воздушной среды в модели подземного сооружения метрополитена:

$$\Delta T_{\text{в}} = \frac{Q \cdot \left(\frac{Q}{3,32\pi \cdot RH} \right)^{0,75} \cdot A}{\frac{c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} \pi \cdot HR^2}{\tau} + A}, \quad (9)$$

где A – эмпирический коэффициент, выраженный

$$A = \left[\frac{\pi \cdot H \left(2 \cdot R + \frac{2\sqrt{\tau \cdot \alpha_{\text{г}}}}{3} \right)}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\sqrt{\tau \cdot \alpha_{\text{г}}}}{\lambda_{\text{г}}}} \right]. \quad (10)$$

Анализ результатов расчёта позволяет сделать вывод о том, что при обычном функционировании станции метрополитена в умеренном (примерно $Q = 5 \cdot 10^5$ Вт) режиме в течение года расхождение между полученными результатами незначительно (~1,1 градуса), так как выделяемое тепло в основном аккумулируется грунтовым массивом, глубина прогретого слоя которого гораздо больше

толщины строительной части сооружения. Для работы оборудования в теплонапряжённом режиме (примерно $Q = 5 \cdot 10^6$ Вт) в течение, например, $2,6 \cdot 10^6$ с (примерно одного месяца) результаты отличаются существенно (около 30%).

Если температура среды является периодической функцией времени, то распределение температуры в твёрдом теле (массиве «железобетон – грунт»), нагреваемом этой средой, будет аналогично распределению смещения колеблющихся точек при распространении волнового процесса в упругой среде. Для полуограниченного пространства тепло, поглощаемое единицей площади поверхности стенки за полупериод, определяется выражением

$$\Delta Q_{\text{г}} = 2c_{\text{р}} \sqrt{\frac{a}{\omega}}, \quad (11)$$

где a/ω – величина, характеризующая условную толщину равномерного прогревания однородного полуограниченного тела в стационарно-периодическом состоянии. С увеличением частоты колебаний теплоусвоение уменьшается, а при постоянной ω оно зависит только от коэффициента температуропроводности. Глубина H , на которой температурные колебания уменьшаются в 1000 раз по сравнению с колебаниями на поверхности, составит $H = 1,1 \sqrt{8 \cdot \pi \Psi}$, где Ψ – коэффициент теплоусвоения.

Для грунтового массива при периодах колебаний времени $86,4 \cdot 10^3$ с (1 сутки) и $31,5 \cdot 10^6$ с (примерно 1 год) величина H составила 0,2 и 8,2 метра соответственно.

После оценки допущений приближенными методами проведён расчёт аналитической математической модели с масштабным переносом для реального единого строительного комплекса метрополитена с защитными устройствами гражданской обороны и дополнительной системой сооружений с геометрическими параметрами и теплофизическими характеристиками материалов.

Анализ полученных результатов позволил определить пути решения проблемы отвода теплоизбытков, а именно:

а) требуемый температурный режим в едином строительном комплексе в основном будет обеспечен за счёт теплоаккумулирующей способности железобетонной конструкции сооружения и прилегающего грунтового массива;

б) значительное влияние на темп роста температуры в стволе тоннеля сооружения станции метрополитена оказывает коэффициент теплоотдачи. При значениях $\alpha = 8$ на-

блюдается снижение темпа роста T_b для умеренного и теплонапряженного режимов на 7,8 и 32,7% соответственно по сравнению с $\alpha = 4$. Следовательно, необходимо в таком случае интенсифицировать процесс теплообмена между воздушной средой в едином строительном комплексе и внутренней поверхностью строительной конструкции;

в) необходимо оптимизировать продолжительность работы технологического оборудования в различных режимах и их чередование. Для случая скачкообразного изменения величины теплового потока, согласно методу суперпозиции, решение задачи может быть представлено в виде суммы решений для элементарных задач с любыми пограничными условиями. При этом алгебраическая сумма граничных условий в этих задачах в любой момент времени должна равняться граничному условию основной задачи в каждой точке поверхности. Действие источника тепловыделений представляется как сумма действий комбинации двух источников, расположенных на том же месте и имеющих в сумме ту же интенсивность, что и исходный источник.

Задача состоит в разработке алгоритма функционирования технологического оборудования станции метрополитена (работа агрегатов в «горячем» режиме, который является предпочтительным с точки зрения эффективности, чередуется с работой в «холодном» режиме), чтобы выполнялось условие $T_b \leq 298$ К, а суммарное время работы в «горячем» режиме за эксплуатационный период было бы максимально возможным.

На рис. 2 представлена циклограмма функционирования сооружения метрополитена в соответствии с данным алгоритмом. Особенностью предложенного алгоритма является то, что переход от режима с меньшей мощностью тепловыделений к режиму с большей мощностью осуществляется в момент достижения локального минимума расчётной кривой. При достижении предельно допустимых значений температуры в сооружении (окончание последнего «холодного» режима) автоматически включается система обеспечения температурно-влажностного режима (СО ТВР). Затем через $1,7-2,6 \cdot 10^6$ с (примерно 20–30 суток) цикл повторяется. Таким образом, регулирование температуры в течение $6 \cdot 10^6$ с (примерно 70 суток) происходит в экономном режиме функционирования (или без участия) СО ТВР.

Заключение

Кроме того, проведенные исследования различных по форме моделей (полубесконечный стержень, полый цилиндр, многослойный полый цилиндр) подземных станций метрополитена, характеризующих основные строительные модули метрополитена, позволили подтвердить предположение о существовании локального минимума расчётной кривой изменения температуры на поверхности в результате действия теплового источника (например, подвижного состава) с учётом граничных условий второго и третьего рода со скачкообразным (более чем на 30%) уменьшением энергопотребления.

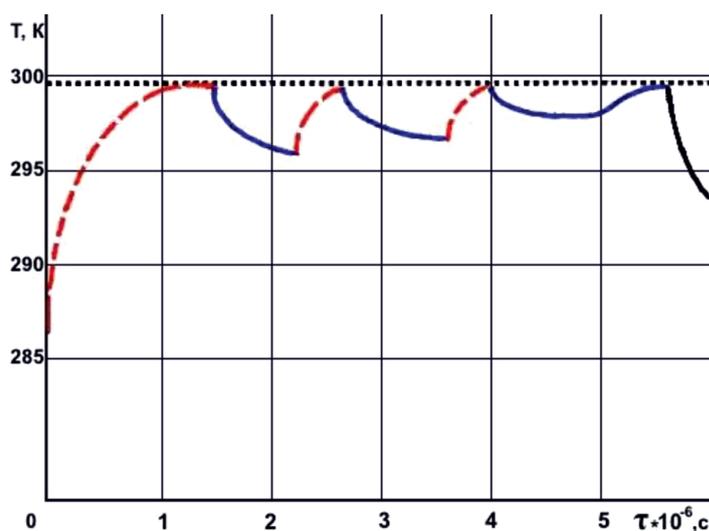


Рис. 2. График изменения температуры в едином строительном комплексе:

— · — · — · режим нагрева; — режим охлаждения; — работа СО ТВР

Таким образом, поддержание температурных параметров осуществляется с использованием теплоаккумулирующей способности грунтового основания, что в полной мере соответствует требованиям ФЗ (№ 261 от 23.11.2009, № 221 от 19.07.2018) по энергосбережению, а также позволяет использовать инновационные энергетические установки.

Список литературы / References

1. Береговой А.М., Береговой В.А., Гречишкин А.В., Воскресенский А.В. Ограждающие конструкции с регулируемыми параметрами теплопереноса // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 1. С. 97–101.
2. Журмилова И.А., Штым А.С. Теплофизические свойства увлажнённого песка – наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2017. № 2 (31). С. 100–109. DOI: 10.5281/zenodo.808872.
3. Zhurmilova I.A., Shtym A.S. Thermophysical properties of moistened sand filler for wells with ground heat exchangers // Vestnik Inzhenernoy shkoly DVFU. 2017. № 2 (31). P. 100–109 (in Russian).
4. Кияница Л.А. К вопросу определения аналитических зависимостей теплового потока в грунт из подземных сооружений станций закрытого типа метрополитена мелкого заложения с двухпутным тоннелем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 2. С. 89–102. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-89-102.
5. Kiyanita L.A. On the problem of determining the analytical dependences of heat flow into the ground from underground structures of closed type underground stations of shallow laying with a double track tunnel // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal). 2018. № 2. P. 89–102 (in Russian).
6. Лугин И.В., Алферова Е.Л. Исследование теплового потока в грунтовой массив из двухпутного тоннеля метрополитена мелкого заложения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 2. С. 305–314.
7. Lugin I.V., Alferova E.L. Investigation of heat flow into the soil mass from the double-track tunnel of the underground of shallow laying // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal). 2017. № 2. P. 305–314 (in Russian).
8. Лугин И.В., Красюк А.М., Пьянкова А.Ю. Определение размеров массива грунта подверженного тепловому влиянию подземных станций метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 6. С. 212–221.
9. Lugin I.V., Krasuyuk A.M., Pyankova A.Yu. Determination of the size of the soil mass subject to thermal influence of underground metro stations // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal). 2016. № 6. P. 212–221 (in Russian).
10. Ядовина К.С., Машенко А.В. О практическом значении определения теплофизических свойств сезоннопромерзающих грунтов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 81–89. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.07.
11. Yadovina K.S., Mashchenko A.V. On the practical significance of determining the thermophysical properties of seasonally frozen soils // Vestnik PNIPU. Stroitelstvo i arkhitektura. 2017. T. 8. № 1. P. 81–89 (in Russian).
12. Denisov O.V., Bulygin Yu.I., Ponomarev A.E., Ponomareva I.A., Lebedeva V.V. Innovative solutions shockproof protection in occupations associated with an increased risk of injury. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Current Problems and Solutions. «Ecology and Safety in the Tech-nosphere: Current Problems and Solutions». 2017. p. 012044.
13. Губеладзе О.А., Москаев В.А. Исследование теплового воздействия на корпус транспортно-упаковочного комплекта // Глобальная ядерная безопасность. 2012. № 1. С. 63–70.
14. Gubeladze O.A., Moskaev V.A. Research of the high-temperature influence on the transport packaging kit body // Global-naya yadernaya bezopasnost. 2012. № 1. P. 63–70 (in Russian).
15. Denisov O., Pleshko M., Merenyashev V., Ponomareva I. Scale factor management in the studies of affine models of shockproof garment elements. E3S Web of Conferences «High-Rise Construction 2017, HRC 2017». 2018. p. 03068. DOI: 10.1051/e3sconf/20183303068.
16. Kajtar L., Nyers J., Szabo J. Dynamic thermal dimensioning of underground spaces. Energy. 2015. V. 87. P. 361–368. DOI: 10.1016/j.energy.2015.04.112.
17. Shilin M.B., Abramov V.M., Andreeva E.S., Andreev S.S., Yayli E.A. Innovative technologies for geo-ecological support while artificial coastal territories development. International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2019. V. 19. № 5.1. P. 399–406. DOI: 10.5593/sgem2019/5.1/S20.050.