УДК 622.271.7: 624.139.2
DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-6-17

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

EFFICIENCY OF UNDERGROUND SPACE USE IN HARSH CLIMATIC CONDITIONS

В. А. Стетюха, Забайкальский государственный университет, г. Чита
stetjukha_chita@mail.ru

V. Stetyukha, Transbaikal State University, Chita

О*бъектом исследования* являются массивы пород с размещенными в них подземными сооружениями, расположенные в регионах с суровым климатом. *Предмет исследования* – температура в массиве породы в естественных условиях и в зоне размещения сооружения, а также параметры энергетической эффективности подземного объекта. *Цель работы* – определить влияние теплоизоляции и заглубления сооружения от поверхности на достижение энергетической эффективности подземных объектов в регионах с суровыми климатическими условиями. *Задачами* являются определение полей температуры в породах северных регионов и температуры в массиве породы, примыкающей к сооружению; определение потери тепловой энергии при различных технических характеристиках подземного сооружения. *Методика* определения полей температуры в массиве породы и потери тепловой энергии сооружением основана на решении нестационарной задачи теплопереноса. Поля температуры определяются с использованием программного комплекса ЛИРА. Рассматривается характер колебаний температуры ближайших к поверхности слоев породы в условиях северных регионов. Исследуются колебания температуры на контуре подземного сооружения. Выполняется оценка потери тепловой энергии подземным сооружением. Определяется влияние теплоизоляции и заглубления сооружения на его энергетическую эффективность. Область применения результатов исследования связана с оценкой потери энергии таких подземных сооружений как тоннели, холодильники, автостоянки, склады и другие объекты. В результате исследований установлено, что рациональное использование подземного пространства в наибольшей степени зависит от качества теплоизоляции объекта. Значительное сокращение потерь тепловой энергии подземным сооружением достигается при одновременной реализации таких мероприятий, как использование теплоизоляции и заглубление объекта

Ключевые слова: *подземные сооружения, температура грунта, колебания температуры, северные регионы, теплоизоляция, теплопроводность, эффективность, энергосбережение, метод конечных элементов, теплопередача*

T*he object of the study* is rock masses with underground structures located in regions with a harsh climate. *The subject of the study* is the temperature in the rock mass in natural conditions and in the area where the structure is located, as well as the parameters of the energy efficiency of the underground facility. *The purpose of the study* is to determine the effect of thermal insulation and deepening of a structure from the surface on achieving the energy efficiency of underground facilities in regions with harsh climatic conditions. The tasks are to determine the temperature fields in the rocks of the northern regions and the rock temperature in the massif adjacent to the structure, to determine the loss of thermal energy with various technical characteristics of the underground structure. The method for determining the temperature fields in the rock massif and the loss of thermal energy by the structure is based on solving the non-stationary problem of heat transfer. The temperature fields are determined using the LIRA software package. The nature of temperature fluctuations of the rock layers closest to the surface in the conditions of the northern regions is considered. Temperature fluctuations on the contour of an underground structure are investigated. An assessment of the loss of thermal energy by an underground structure is being carried out. The influence of thermal insulation and deepening of the structure on its energy efficiency is determined. The field of

© В. А. Стетюха, 2022

application of the results of the study is related to the assessment of the energy loss of such underground structures as tunnels, refrigerators, parking lots, warehouses and other facilities. As a result of the research, it has been found that the rational use of underground space to the greatest extent depends on the quality of the thermal insulation of the object. A significant reduction in the loss of thermal energy by an underground structure is achieved with the simultaneous implementation of such measures as the use of thermal insulation and deepening of the object

Key words: *underground structures, rock temperature, temperature fluctuations, northern regions, thermal insulation, thermal conductivity, efficiency, energy saving, finite element method, heat transfer*

Введение. Энергетическая эффективность использования ресурсов в нашей стране обозначена как «приоритетное направление модернизации» экономики России. В последнее время такой подход начинает играть важнейшую роль при разработке любых новых проектов. Целью многих исследований является достижение минимальной энергетической зависимости от внешних источников энергии. Следует отметить, что климат и энергетика тесно связаны между собой. Значительная часть энергетических ресурсов в регионах с суровыми климатическими условиями затрачивается на поддержание в помещениях необходимой температуры воздуха. По данным [1], на отопление жилых зданий в холодный период года расходуется 40 % произведенной тепловой энергии.

В условиях сурового климата находятся значительные регионы Северного полушария [10; 11; 13; 15]. В таких климатических условиях должны выбираться свои оригинальные способы достижения энергетической эффективности. Один из способов – использование подземного пространства. Под землей размещают трубопроводы, тоннели, складские помещения, холодильники, автостоянки, электростанции, узлы связи и т. д. [2; 16]. Перспективным можно считать размещение под землей объектов с высоким уровнем шума.

Использование подземного пространства может заметно повышать энергетическую эффективность сооружений, что отмечается на примере подземных сооружений в США и в странах Северной Европы [4]. Некоторые вопросы и условия эффективности таких объектов приводятся в работах [6; 12; 16]. Исторический опыт показывает интуитивный выбор мероприятий по эффективному использованию подземного пространства. Современные научные достижения позволяют включать в этот процесс методы прогнозирования. В этом случае вместо энергозатратной борьбы с природными условиями реализуется гармоничное встраивание объектов в эти условия.

Эффективность использования подземного пространства зависит от фактической разницы температуры в помещениях под землей и температуры окружающих пород в разные периоды года. Затраты энергии на обогрев подземных сооружений будут минимальными, когда расчетная температура воздуха в помещениях и температура окружающей породы окажутся максимально близкими по величине. Кроме этого на энергетическую эффективность подземного сооружения значительное влияние оказывает выбор таких параметров, как глубина его размещения от поверхности и степень теплоизоляции. Вопросы оценки эффективности использования подземных сооружений в суровых климатических условиях в настоящее время разработаны недостаточно. Повышение энергетической эффективности таких объектов в регионах с низкими температурами наружного воздуха является особенно *актуальным*.

Объектом исследования являются массивы пород с размещенными в них подземными сооружениями.

Предмет исследования – колебания температуры в массиве породы в естественных условиях и в зоне размещения сооружения, а также параметры энергетической эффективности подземного объекта.

Цель работы – определить влияние теплоизоляции и заглубления сооружения от поверхности на достижение энергетической эффективности подземных объектов в регионах с суровыми климатическими условиями.

Выполняются задачи по определению полей температуры в породах северных регионов и температуры породы в массиве, примыкающем к сооружению, по определению потери тепловой энергии при различных технических характеристиках подземного сооружения.

Расчетная температура внутреннего воздуха в помещениях регламентируется различными документами. Для жилых и производственных помещений температурный режим регламентируется санитарными нормами

(САНПИН 2.1.2.2645-10 и САНПИН 2.2.4.548-96), нормами, представленными в сводах правил. В СП 109.13330.2012. Холодильники рекомендуемый диапазон температуры в помещениях зависит от вида сохраняемой продукции и колеблется в интервале от -30 °С до +20 °С. Согласно СП 113.13330.2016. Стоянки автомобилей, рекомендуемая температура в отапливаемых помещениях не должна быть меньше + 5 °С. Температура в складских помещениях регламентируется приказом Роскомнадзора от 28.06.93 № 44. Рекомендуемый интервал температуры для помещений разного назначения находится в пределах от + 16 °С до +5 °С.

Важную роль при оценке энергетической эффективности подземных сооружений играет наличие объективной информации о температурном режиме массивов пород, окружающих объект по всему контуру. Температура приповерхностного слоя породы в естественных условиях для некоторых регионов с суровым климатом приводится в работах [5; 7; 8; 9]. Колебания температуры горных пород на разной глубине в течение года и средние температуры за год в регионах Канады и Центрального Забайкалья представлены в табл. 1, на рис. 1–4. По данным [7], на Северном участке газопровода в Канаде на глубине 8 м максимальные перепады температуры за год составляют около 0,6 °С, на глубине 4 м – около 2 °С. При этом средняя температура на указанной глубине составляет соответственно -2,6 и -2,5 °С. На южном участке газопровода средняя температура породы сохраняется положительной. Перепады температуры на аналогичной глубине мало отличаются от перепадов температуры на северном участке. На глубине 2 м перепады температуры за год достигают 4 °С.

Таблица 1 / Table 1

Температура в массиве породы / Temperature in the rock mass

Расстояние от дневной поверхности, м / Distance from the day surface, m	**Характеристики температуры / Temperature characteristics**	**Температура в местах расположения скважин, °С / Temperature at well locations, °С**			
		Центральное Забайкалье, скважина № 2 [5] / Central Transbaikalia, well No. 2 [5]	Центральное Забайкалье, скважина № 7 [5] / Central Transbaikalia, well No. 7 [5]	Канада, Thunder River [7] / Canada, Thunder River [7]	Канада, Fort Simpson [7] / Canada, Fort Simpson [7]
1	Средняя температура за год / Average temperature per year	1,7	-2,1	-1,9	3,6
	Перепад температуры за год / Temperature drop per year	24	18	8,8	5,8
2	Средняя температура за год / Average temperature per year	1,3	-2,8	-2,2	3,9
	Перепад температуры за год / Temperature drop per year	12	7,5	4,1	4,3
4	Средняя температура за год / Average temperature per year	1,3	-2,3	-2,4	4,3
	Перепад температуры за год / Temperature drop per year	5,5	4,2	1,9	2,9
6	Средняя температура за год / Average temperature per year	1,2	-1,9	-2,5	4,3
	Перепад температуры за год / Temperature drop per year	3	1,9	1	1,8

Окончание табл. 1

8	Средняя температура за год / Average temperature per year	1,4	-1,7	-2,6	4,2
	Перепад температуры за год / Temperature drop per year	1,7	1	0,6	0,5
10	Средняя температура за год / Average temperature per year	1,4	-1,5	-2,7	-

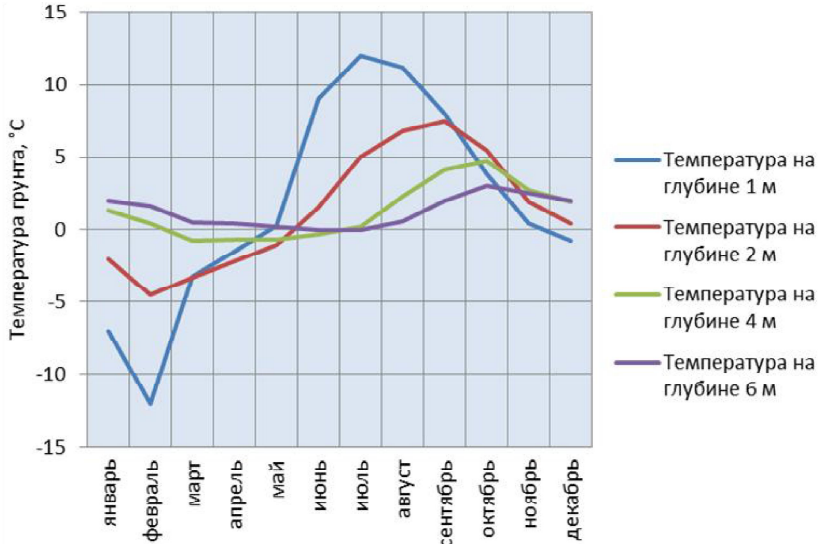

Рис. 1. Колебания температуры породы в скважине 2 (Центральное Забайкалье [5]) / Fig. 1. Rock temperature fluctuations in a well 2 (Central Transbaikalia [5])

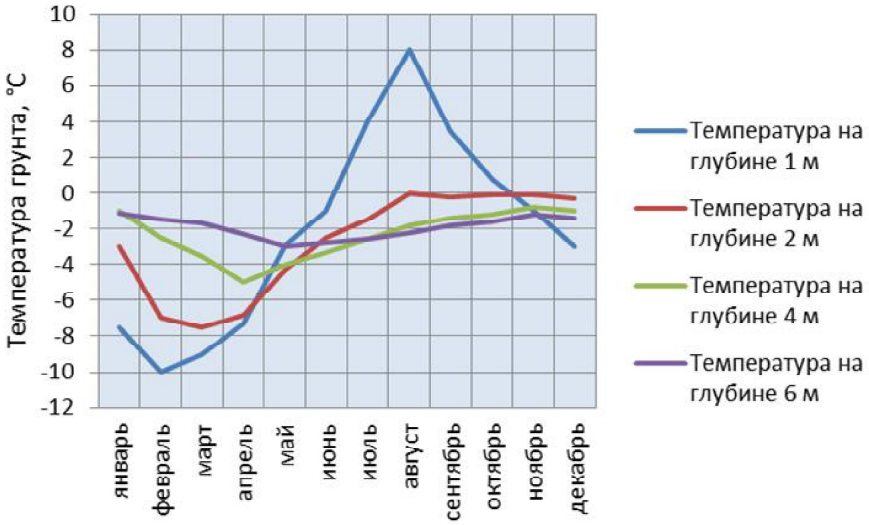

Рис. 2. Колебания температуры породы в скважине 7 (Центральное Забайкалье [5]) / Fig. 2. Rock temperature fluctuations in a well 7 (Central Transbaikalia [5])

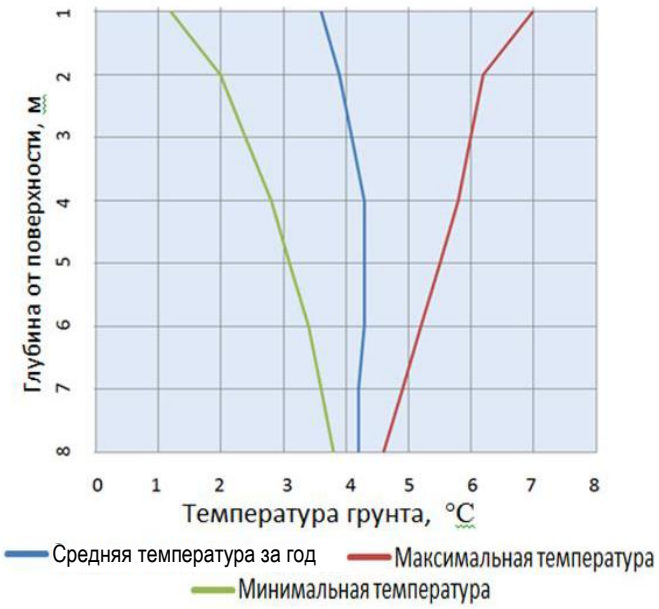

Рис. 3. Колебания температуры породы в Канаде (Fort Simpson [7]) /
Fig. 3. Rock temperature fluctuations in Canada (Fort Simpson [7])

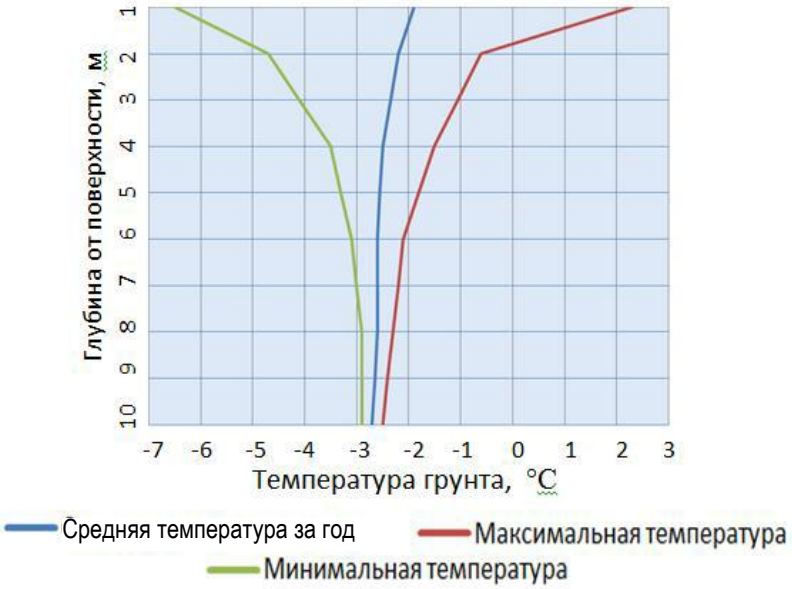

Рис. 4. Колебания температуры породы в Канаде (Thunder River [7]) /
Fig. 4. Rock temperature fluctuations in Canada (Thunder River [7])

В условиях Центрального Забайкалья [5] сезонные колебания температуры породы на глубине 4 м составляют около 4...5 °С для обеих приведенных в табл. 1 скважин. На глубине 2 м перепад температуры в течение года достигает 8...12 °С. В скважине № 2 на глубине 10 м наибольшее понижение температуры в течение года происходит до + 0,8 °С, на глубине 4 м – до 0,8 °С со знаком минус, на глубине 2 м – до - 6 °С.

С учетом фактора инерции и возможного использования теплоизоляции колебания температуры породы в течение года на глубине становятся еще менее значительными. В таких условиях при температуре воздуха в помещениях автостоянок, в складских и в других

помещениях с низкой расчетной температурой внутреннего воздуха затраты тепла на обогрев помещений остаются минимальными.

Методика определения полей температуры в массиве породы и потери тепловой энергии сооружением основаны на решении нестационарной задачи теплопереноса. Исследования характера колебаний температуры породы на внешнем контуре подземного сооружения и распределение полей температуры породы вокруг сооружения выполнялись с использованием программного комплекса ЛИРА. Для оценки влияния на эффективность подземных сооружений таких факторов, как глубина размещения объекта от поверхности и размеры слоев теплоизоляции выполнены вычисления потери объектом тепловой энергии в отдельные месяцы и в период наибольшей потери энергии – в феврале. Потери тепла подземным сооружением определялись по методике [3]

$$Q = F \cdot K \cdot z \cdot (t_v - t_s), \quad (1)$$

где F – площадь контактирующей с породами поверхности сооружения, м^2;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2 ×°С);

z – промежуток времени, ч;

t_v – температура воздуха в помещениях, °С;

t_s – средняя температура массива породы, примыкающего к сооружению, °С.

В качестве объекта рассматривается подземное сооружение, размещенное на глубине 1,25 и 2,25 м от дневной поверхности (рис. 5). По наружному контуру сооружения расположена теплоизоляция. Поперечное сечение подземного сооружения по внутреннему контуру составляет 4х20 м, длина – 100 м. Толщина наружных стен из бетона принимается равной 0,5 м, толщина конструкций пола и перекрытий – 0,25 м. Температура воздуха в помещениях составляет +8° С, что соответствует нормативам температуры для стоянок автомобилей и для отдельных складских помещений. Температура наружного воздуха и характер распределения температуры пород по глубине в естественных условиях в разные периоды года принимались для региона Центрального Забайкалья по данным свода правил (СП-131.13330.2020) и по исследованиям, представленным в работе [5]. При решении задачи теплопроводности коэффициент теплопроводности бетона принимается равным λ = 1,69 Вт/(м ×°С), теплоемкость бетона с = 0,84 кдж/(кг ×°С), плотность – γ = 2,5 г/см^3. Теплофизические характеристики суглинка с плотностью γ = 1,8 г/см^3: λ = 2 Вт/(м ×°С), с = 1,75 кдж/(кг ×°С). Соответствующие параметры теплоизолятора (пенополистирол): λ = 0,03 Вт/(м ×°С), с = 1,34 кдж/(кг ×°С), γ = 0,035 г/см^3.

Значения температуры горной породы на наружной границе теплоизоляции на разных участках контура сооружения, заглубленного на 1,25 и 2,25 м, при толщине изоляции 0,25 м по всему контуру приводятся в табл. 2.

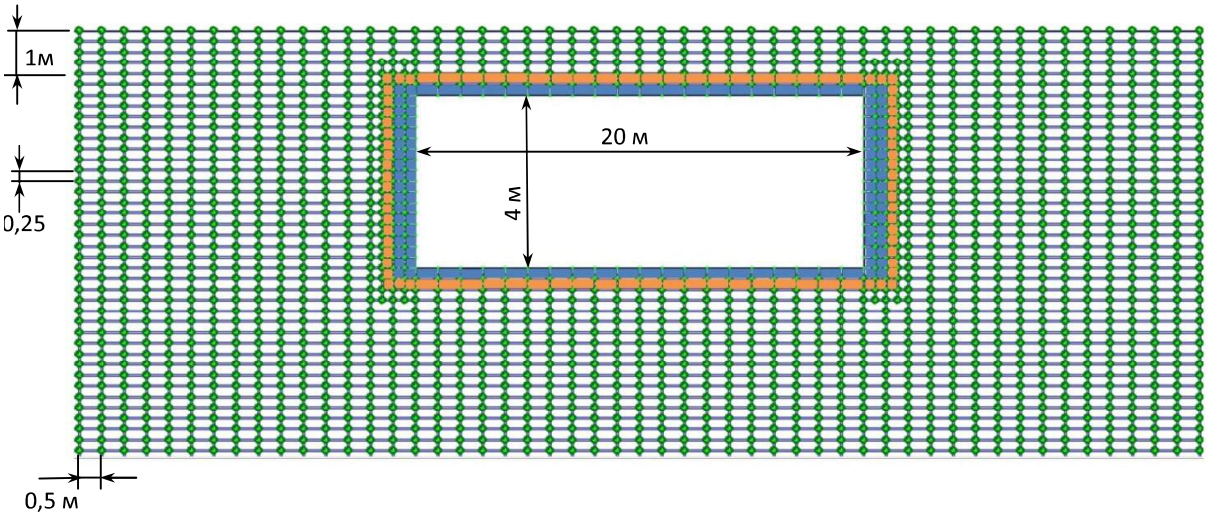

Рис. 5. Расчетная схема подземного сооружения / Fig. 5. Calculation scheme of an underground structure

Таблица 2 / Table 2

Значения температуры на внешнем контуре слоев теплоизоляции сооружения при толщине теплоизоляции 0,25 м / Temperature values at the outer contour of the thermal insulation layers of a structure with a thermal insulation thickness of 0,25 m

Период времени и расстояние от дневной поверхности, м / Time period and distance from the day surface, m	**Значения температуры в характерных точках, °С / Temperature values at characteristic points, °С**						
	точки конструкции покрытия / pavement construction points		точки конструкции пола / floor construction points		точки конструкции стен / wall construction points		
	средняя / middle	угловая / angular	средняя / middle	угловая / angular	верхняя / upper	средняя / middle	нижняя / lower
Январь, расстояние до верха покрытия – 1,25 м / January, distance to the top of the cover – 1,25 m	-8,4	-8,5	2,8	2,7	-3,4	1,6	2,4
Февраль, расстояние до верха покрытия – 1,25 м / February, distance to the top of the cover – 1,25 m	-11,3	-11,5	2,5	2,4	-7,4	0,8	2,0
Январь, расстояние до верха покрытия – 2,25 м / January, distance to the top of the cover – 2,25 m	-0,6	-1,0	3,0	2,8	-0,1	2,4	2,8
Февраль, расстояние до верха покрытия – 2,25 м / February, distance to the top of the cover – 2,25 m	-3,1	-3,5	2,6	2,4	-1,3	1,6	2,3

Значения температуры породы в феврале на участках контура сооружения, заглубленного на 2,25 м от дневной поверхности, при разных размерах теплоизоляции контура представлены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Значения температуры в феврале на внешнем контуре слоев теплоизоляции сооружения, размещенного на глубине 2,25 м / Temperature values in February at the outer contour of the thermal insulation layers of a structure located at a depth of 2,25 m

Размеры теплоизоляции, м / Thermal insulation dimensions, m	**Значения температуры в характерных точках, °С / Temperature values at characteristic points, °С**						
	точки конструкции покрытия / pavement construction points		точки конструкции пола / floor construction points		точки конструкции стен / wall construction points		
	средняя / middle	угловая / angular	средняя / middle	угловая / angular	верхняя / upper	средняя / middle	нижняя / lower
0,25	-3,1	-3,5	2,6	2,4	-1,3	1,6	2,3
0,5	-5,2	-5,4	2,3	2,2	-1,6	1,2	2,0
1,0	-9,5	-9,6	2,3	2,2	-1,8	0,8	1,9

Приводимая в таблицах температура породы, примыкающей к контуру сооружения, определяет затраты тепловой энергии на обогрев помещений. Для сооружения, заглубленного на 1,25 м с изоляцией 0,25 м, наиболее низкие температуры отмечаются у внешнего контура покрытия. Минимальных значений они достигают в феврале. Температура породы ниже ограждающих конструкций пола изменяется незначительно по отношению к температуре примыкающего массива породы в естественном состоянии. Температура породы у наружного контура стен понижается более интенсивно с приближением точек контура к дневной поверхности.

При дополнительном заглублении подземного сооружения с изоляцией 0,25 м до 2,25 м от поверхности температура у контура

покрытия повышается в феврале более чем в три раза, у середины стены – в два раза. У контура конструкций пола отмечаются незначительные изменения температуры.

По данным табл. 3 можно оценить влияние теплоизоляции на температуру у контура для заглубленного на 2,25 м объекта. В средней точке покрытия с увеличением толщины изоляции от 0,25 м до 0,5 м температура понижается более чем в 1,5 раза, с увеличением толщины изоляции от 0,25 м до 1 м температура понижается более чем в 2,7 раза. У средней по высоте точке стены с увеличением толщины изоляции от 0,25 м до 0,5 м температура понижается на 25 %, с увеличением толщины изоляции от 0,25 м до 1 м температура понижается в 2 раза.

На рис. 6 и 7 представлен характер распределения температуры в окружающих сооружение массивах пород в феврале при разном заглублении и разных размерах теплоизоляции ограждающих конструкций. Влияние

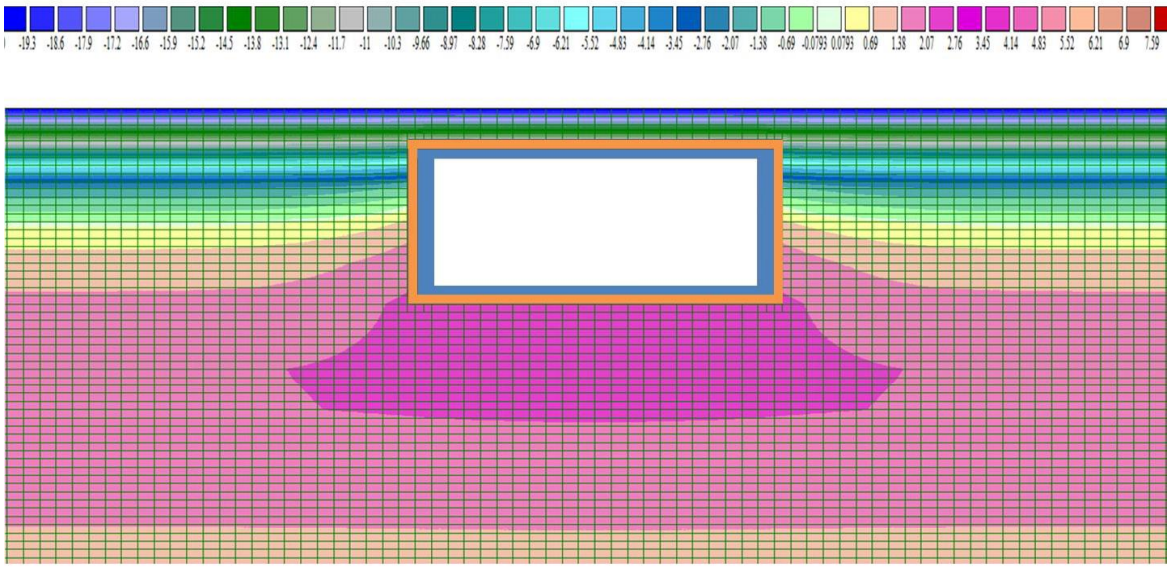

Рис 6. Распределение температуры в массиве породы при заглублении сооружения на 1,25 м и изоляции контура 0,25 м / Fig. 6. Temperature distribution in the rock mass at the depth of the structure by 1,25 m and the isolation of the circuit by 0,25 m

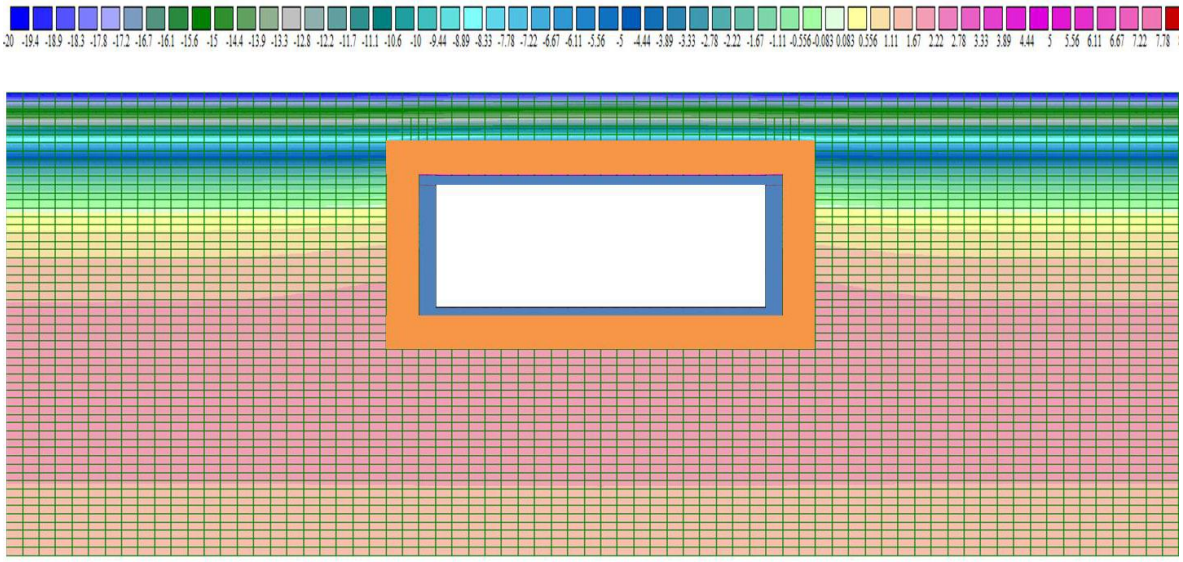

Рис. 7. Распределение температуры в массиве породы при заглублении сооружения на 2,25 м и изоляции контура 1 м / Fig. 7. Temperature distribution in the rock mass when the structure is buried by 2,25 m and the contour is isolated by 1 m

положительных температур в помещениях на температуру породы при слое изоляции 0,25 м составляет в горизонтальном направлении около 8 м, что совпадает с результатами, представленными в работе [14]. Значительное увеличение толщины изоляции до 1 м снижает это влияние до 5 м. С увеличением размеров теплоизоляции также отмечается значительное уменьшение влияния температуры в помещениях на температуру примыкающих пород у покрытия и пола объекта.

Для оценки энергетической эффективности таких мероприятий как степень теплоизоляции объекта и глубина его размещения от поверхности определены потери тепловой энергии через ограждающие конструкции. Результаты определения потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции сооружения, размещенного на глубине 1,25 м при толщине теплоизоляции 0,25 м, представлены в табл. 4.

Таблица 4 / Table 4

Потеря тепловой энергии в разные периоды года / Loss of thermal energy in different periods of a year

Период времени / Period of time	**Суммарные потери энергии через конструкции покрытия, пола и стен, кВт ×ч / Total energy losses through the structures of the roof, floor and walls, kW×h**
Январь /January	4184
Февраль / February	4815
Март / March	3541
Апрель / April	3237
Май / May	2944
Июнь / June	1439
Июль / July	828
Август / August	718
Сентябрь / September	1185
Октябрь / October	1674
Ноябрь / November	2514
Декабрь / December	3397
Всего за год / Total for a year	30476

Как видно из представленных результатов, наибольшие потери энергии в феврале могут характеризовать энергетическую эффективность сооружения в целом. В табл. 5 и 6 приводятся величины потери тепловой энергии подземным сооружением в феврале при изменении таких конструктивных параметров как величина теплоизолирующего слоя и разное заглубление сооружения от дневной поверхности.

Таблица 5 / Table 5

Потеря тепловой энергии заглубленным на 2,25 м сооружением в феврале при разных размерах теплоизоляции / Loss of thermal energy by a structure buried by 2,25 m in February with different sizes of thermal insulation

Размеры теплоизоляции сооружения, заглубленного на 2,25 м, м / Dimensions of the thermal insulation of the structure, buried by 2.25 m, m	**Потери энергии, кВт × ч / Energy losses, kW×h**			
	через конструкции покрытия / through cover constructions	через конструкции пола / through floor constructions	через конструкции стен / through wall constructions	всего / total
0,25	1860	900	509	3269
0,5	1120	480	278	1878
1	760	480	154	1394

Таблица 6 / Table 6

Потеря тепловой энергии в феврале с изменением толщины изоляции и заглубления объекта / Loss of thermal energy in February with a change in the thickness of the insulation and the depth of the object

Период времени и технические особенности / Time period and technical features	**Потери энергии, кВт × ч / Energy losses, kW×h**			
	через конструкции покрытия / through cover constructions	через конструкции пола / through floor constructions	через конструкции стен / through wall constructions	всего / total
Заглубление 1,25 м, теплоизоляция 0,25 м / Depth 1,25 m, thermal insulation 0,25 m	3223	918	674	4815
Заглубление 2,25 м, теплоизоляция 0,25 м Depth 2,25 m, thermal insulation 0,25 m	1860	900	509	3269
Заглубление 2,25 м, теплоизоляция 0,5 м Depth 2,25 m, thermal insulation 0,5 m	1120	480	278	1878

Уменьшение потери тепла через перекрытие в феврале сооружением, размещенным на глубине 2,25 м, с увеличением толщины теплоизоляции от 0,25 м до 0,5 м происходит более чем в 1,7 раза, через пол – в 1,9 раза, через стены – в 1,8 раза. С увеличением толщины изоляции от 0,25 м до 1 м потери тепла через перекрытие уменьшаются более чем в 2,5 раза, через пол – в 1,9 раза, через стены – в 3,3 раза. При изоляции 0,25 м увеличение заглубления сооружения с 1,25 м до 2,25 м уменьшает потери тепловой энергии через перекрытие более чем в 1,7 раза, через пол – в 1,02 раза, через стены – в 1,3 раза.

Одновременное заглубление объекта до 2,25 м и его изоляция по всему контуру толщиной 0,5 м уменьшает потери тепла по сравнению с объектом с теплоизоляцией 0,25 м и заглублением 1,25 м через перекрытие в 2,9 раза, через пол – в 1,9 раза, через стены – в 2,4 раза.

Заглубление объекта мало влияет на потерю энергии через конструкции пола, так как температура примыкающего массива породы остается почти одинаковой на сравниваемой глубине от поверхности. Площадь стен значительно меньше площади покрытия или пола, чем объясняется количество энергии, теряемой через стены.

Для всех рассмотренных вариантов наибольшая потеря тепловой энергии происходит через покрытие сооружения. При разных конструктивных параметрах изменяется лишь доля этих потерь от суммарной потери энергии всем сооружением.

Заключение. Выполнена оценка характера температурных полей в массивах пород в регионах Северного полушария. Исследовано влияние сооружения на температуру примыкающих массивов пород и потерю тепловой энергии в наиболее энергоемкий отрезок времени в феврале. Рациональное использование подземного пространства в суровых климатических условиях при положительных температурах породы и при рассматриваемой температуре наружного воздуха в наибольшей степени зависит от качества теплоизоляции. Одновременное использование таких мероприятий как теплоизоляция и значительное заглубление объекта в рассматриваемых пределах приводит к сокращению потерь тепловой энергии в феврале более чем в 3,4 раза по сравнению с наиболее энергозатратным из рассмотренных здесь вариантов. Эффективность подземного объекта при выборе оптимальных параметров изоляции и заглубления оказывается наибольшей.

Список литературы

1. Асаул А. Н., Казаков Ю. Н., Пасяда Н. И., Денисова И. В. Теория и практика малоэтажного жилищного строительства в России. СПб.: Гуманистика, 2005. 563 с.

2. Конюхов Д. С. Анализ сложившихся классификационных систем подземных сооружений // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 48—55.

3. Рымаров А. Г., Титков Д. Г. Особенности потерь теплоты в массивах грунта подземного коммуникационного коллектора. Текст: электронный // Строительство: наука и образование. 2014. № 4. URL: http://www.nso-journal.ru. (дата обращения: 18.08.2022).

4. Тетиор А. Н., Логинов В. Ф. Проектирование и строительство подземных зданий и сооружений. Киев: Будивельник, 1990. 168 с.

5. Шполянская Н. А. Вечная мерзлота Забайкалья. М.: Наука, 1978. 132 с.

6. Якубсон В. М. Подземное строительство в городах // Инженерно-строительный журнал. 2012. No. 5. С. 2–3.

7. Ground Temperature Data. Summary Report for the Mackenzie Gathering Pipelines, Mackenzie Valley Pipeline. Mackenzie Gas Project. Imperial Oil Resources Ventures Limited. 2006. 33 p. URL: https://apps.cer-rec.gs.ca (дата обращения: 18.08.2022). Текст: электронный.

8. Khimenkov A. N., Sergeev D. O., Vlasov A. N., Kozireva E. A., Rybchenko A. A., SvetlakovA. A. Contemporary and paleo-cryogenic formations on Olkhon island // Earth's Cryosphere. 2015. No. 19. C. 48-57.

9. Li A., Xia C., Bao C., Yin G. Using MODIS Land Surface Temperatures for Permafrost Thermal Modeling in Beiluhe Basin on the Qinghai-Tibet Plateau. Текст: электронный // Sensors. 2019. No. 19. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4200 (дата обращения: 21.08.2022) DOI: 10.3390/s19194200.

10. Luo J., Yin G., Niu F., Lin Z., Liu M. High Spatial Resolution Modeling of Climate Change Impacts on Permafrost Thermal Conditions for the Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau. Текст: электронный *// Remote Sensing*. 2019. No. 11. URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/11/1294 (дата обращения: 21.08.2022). DOI: 10.3390/rs11111294

11. Magnin F., Etzelmuller B., Westermann S., Isaksen K., Hilger P., Hermanns R. Permafrost distribution in steep rock slopes in Norway: measurements, statistical modelling and implications for geomorphological processes // Earth Surface Dynamics. 2019. No. 7. P. 1019–1040. DOI: 10.5194/esurf-7-1019-2019

12. Mazarron F. R., Cid-Falceto J., Canas I. Ground Thermal Inertia for Energy Efficient Building Design: A Case Study on Food Industry *//* Energies. 2012. No. 5. P. 227–242.

13. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Etzelmuller B., Kholodov A., Khomutov A., Kaab A., Leibman M., Lewkowicz A., Panda S., Romanovsky V., Way R., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km^2 scale // Earth-Science Reviews. 2019. No. 193. P. 299–316. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023

14. Sakami N., Boukhattem L., Hamdi H. Soil Inertia and Shallow Basement Envelope Impact on Cellar Internal Temperature // Journal of Renewable Energy and Sustainable Development. 2016. No. 2. P. 30-36. DOI: 0.21622/RESD.2016.02.1.030

15. Tao J., Koster R., Reichle R., Forman B., Xue Y., Chen R., Moghaddam M. Permafrost variability over the Northern Hemisphere based on the MERRA-2 reanalysis // The Cryosphere. 2019. No. 13. P. 2087–2110. DOI: 10.5194/tc-13-2087-2019

16. Tann L., Sterling R., Zhou Y., Metjed N. Systems approaches to urban underground space planning and management – A review // Underground Space. 2020. No. 5. P. 144–166. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.03.003

References

1. Asaul A.N., Kazakov Yu.N., Pasyada N.I., Denisova I.V. *Teoriya i praktika maloetazhnogo zhilishhnogo stroitelstva v Rossii.* (Theory and practice of low-rise housing construction in Russia). Saint Petersburg: Gumanistika, 2005. 563 p.

2. Konyukhov D. S. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo stroitelnogo universiteta* (Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering), 2010, no. 4, pp. 48—55.

3. Rymarov A.G., Titkov D.G. *Stroitelstvo: nauka i obrazovanie*. (Construction: science and education), 2014, no. 4. Available at: http://www.nso-journal.ru (date of access: 18.08.2022). Text: electronic.

4. Tetior A. N., Loginov V. F. *Proektirovanie i stroitelstvo podzemnyh zdaniy i sooruzheniy.* (Design and construction of underground buildings and structures). Kiev: Budivelnyk, 1990. 168 p.

5. Shpolyanskaya N.A. *Vechnaya merzlota Zabaykaliya.* (Permafrost of the Transbaikal region). Moscow: Nauka, 1978. 132 p.

6. Yakubson V. M. *Inzhenerno-stroitelny zhurnal*. (Journal of Civil Engineering), 2012, no. 5, pp. 2–3.

7. Ground Temperature Data. Summary Report for the Mackenzie Gathering Pipelines, Mackenzie Valley Pipeline. Mackenzie Gas Project. Imperial Oil Re-sources Ventures Limited. 2006. 33 p. Available at: https://apps.cer-rec.gs.ca (date of access: 18.08.2022). Text: electronic.

8. Khimenkov A. N., Sergeev D. O., Vlasov A. N., Kozireva E. A., Rybchenko A. A., Svetlakov A. A. Earth's Cryosphere, 2015, no. 19, pp. 48-57.

9. Li A., Xia C., Bao C., Yin G. Sensors, 2019, no. 19. Available at: https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4200 (date of access: 21.08.2022). Text: electronic.

10. Luo J., Yin G., Niu F., Lin Z., Liu M. Remote Sensing, 2019, no. 11. Available at: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/11/1294 (date of access: 21.08.2022).Text: electronic.

11. Magnin F., Etzelmuller B., Westermann S., Isaksen K., Hilger P., Hermanns R. Earth Surface Dynamics, 2019, no. 7, pp. 1019–1040.

12. Mazarron F. R., Cid-Falceto J., Canas I. Energies, 2012, no. 5, pp. 227-242.

13. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Etzelmuller B., Kholodov A., Khomutov A., Kaab A., Leibman M., Lewkowicz A., Panda S., Romanovsky V., Way R., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. Earth-Science Reviews, 2019, no. 193, pp. 299–316.

14. Sakami N., Boukhattem L., Hamdi H. Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2016, no. 2, pp. 30-36.

15. Tao J., Koster R., Reichle R., Forman B., Xue Y., Chen R., Moghaddam M. The Cryosphere, 2019, no. 13, pp. 2087–2110.

16. Tann L., Sterling R., Zhou Y., Metjed N. Underground Space, 2020, no. 5, pp. 144–166.

Информация об авторе **Information about the author**

Стетюха Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, доцент ВАК, профессор кафедры строительства, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: горная теплофизика, геомеханика
stetjukha_chita@mail.ru

Vladimir Stetyukha, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Construction department, Transbaikal State University, Chita, Russia. Research interests: mining thermal physics, geomechanics

Для цитирования

Стетюха В. А. Эффективность использования подземного пространства в суровых климатических условиях // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 8. С. 6–17. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-6-17.

Stetyukha V. Efficiency of underground space use in harsh climatic conditions // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 8, pp. 6–17. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-6-17.

Статья поступила в редакцию: 19.09.2022 г.
Статья принята к публикации: 23.09.2022 г.