

УДК 536:24:622:413

## Оценка эффективности пассивной системы тепловой защиты породного массива

С. А. Гусак, А. О. Орлов, Ю. Г. Смирнов\*, В. В. Бирюков, А. А. Паливода

\*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;  
e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6100-2032>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию  
26.12.2018;

получена  
после доработки  
29.01.2019

Ключевые слова:

математическое моделирование, программный комплекс ANSYS FLUENT, теплообмен, термическое сопротивление, тепловая защита, многолетнемерзлые горные породы, породный массив, камерная горная выработка

Проблема обеспечения устойчивости массива горных пород приобретает особое значение в условиях теплового взаимодействия горных выработок с многолетнемерзлыми горными породами. В статье представлены результаты изучения эффективности пассивной системы тепловой защиты породного массива криолитозоны. На основе численного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS FLUENT выполнены исследования особенностей теплового взаимодействия большепролетной камерной выработки с массивом многолетнемерзлых горных пород. На примере гипотетической трехмерной модели горной выработки с различными вариациями материального состава защитной конструкции (обделки) выработки и использованием конвективного теплообмена в технологическом канале (воздушном зазоре) проведены расчетные исследования особенностей температурного режима конструктивных элементов обделки. Выполнена оценка прогнозируемой глубины оттаивания горной породы в зависимости от конструктивного исполнения и материального состава обделки и продолжительности теплового воздействия на породный массив. Изучено влияние термического сопротивления защитной конструкции горной выработки на глубину и динамику оттаивания породного массива, которая определяет условия сохранения его криогенного состояния и требования к горнотехническим системам регулирования теплового режима. Установлены температурные градиенты, формирующиеся в конструктивных элементах обделки, которые могут способствовать возникновению термических напряжений, оказывающих негативное влияние на напряженно-деформированное состояние защитной конструкции выработки. На примере принятых модельных представлений технологического канала (температура поступающего воздуха, ширина канала) показано слабое влияние теплообмена за счет свободной конвекции на интенсивность теплового взаимодействия горной выработки и породного массива. Для снижения теплового воздействия на защитную конструкцию горной выработки и массива многолетнемерзлых пород необходимо повышение интенсивности теплообмена в технологическом канале за счет понижения температуры воздуха, поступающего в канал, или использования вынужденной конвекции на основе организации специальной системы вентиляции.

Для цитирования

Гусак С. А. и др. Оценка эффективности пассивной системы тепловой защиты породного массива. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 1. С. 72–79. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-72-79

## Assessment of the efficiency of passive thermal protection system of rock massif

Sergey A. Gusak, Alexander O. Orlov, Yury G. Smirnov\*, Valery V. Biryukov, Anita A. Palivoda

\*Mining Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;  
e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6100-2032>

Article info

Received 26.12.2018;  
received in revised  
29.01.2019

Key words:

mathematical modeling, ANSYS FLUENT software complex, heat transfer, thermal resistance, thermal protection, permafrost rocks, rock massif, chamber mine working

Abstract

The problem of ensuring the stability of rock mass is of particular importance in the conditions of thermal interaction of mine workings with permafrost rocks. The paper presents the results of studying the effectiveness of passive thermal protection system of permafrost massif. Based on a numerical modeling by use of ANSYS FLUENT software complex, studies of thermal interaction of a large-span chamber working and permafrost massif have been performed. On the example of a hypothetical three-dimensional model of mine working with different variations in the material composition of the protective structure (lining) of working and the use of convective heat transfer in the technological channel (air gap), it has been performed the calculated study of the features of the temperature regime of the lining structural elements. There has been carried the estimation of the predicted depth of thawing of rock depending on the design and material composition of the lining and the duration of the thermal impact on the rock massif. The influence of the thermal resistance of the mine working protective structure on the depth and dynamics of thawing rock massif has been studied, the structure determines the conditions of preservation of its cryogenic state and requirements for mining systems of regulation of the thermal regime. The temperature gradients formed in the structural elements of the lining, which can contribute to the occurrence of thermal stresses that have a negative impact on the stress-strain state of the protective structure of the mine working have been founded. On the example of the accepted model representations of the technological channel (temperature of the entering air, width of the channel) the weak influence of heat exchange due to free convection on the intensity of thermal interaction of the working and rock massif has been shown. To reduce the thermal impact on the protective structure of the mine working and the permafrost massif it is necessary to increase the intensity of heat exchange in the technological channel by decreasing the temperature of the air entering the channel, or using the forced convection based on the organization of a special ventilation system.

For citation

Gusak, S. A. et al. 2020. Assessment of the efficiency of passive thermal protection system of rock massif. *Vestnik of MSTU*, 23(1), pp. 72–79. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-72-79

## Введение

Обеспечение устойчивости массива горных пород является одной из наиболее сложных задач при проектировании подземных сооружений. Особое значение данная проблема приобретает в условиях теплового взаимодействия горных выработок с многолетнемерзлыми горными породами (ММГП). Из практики подземного строительства известно, что оттаивание мерзлых пород приводит к уменьшению или потере цементирующего действия льда, что сопровождается нарушением связности, ослаблением сцепления отдельных блоков и, как следствие этого, снижением устойчивости горных пород (Изаксон и др., 1989; Курилко и др., 2010).

Значение теплового фактора при проектировании и строительстве подземных сооружений особо отмечается в нормативном документе ТСН-31-323-2002<sup>1</sup>, регламентирующем проектирование вновь строящихся и реконструируемых подземных объектов различного назначения, размещаемых в криолитозоне. В этом документе, в частности, отмечается, что при подземном размещении в криолитозоне объектов, эксплуатирующихся с положительным тепловым режимом, следует предусматривать конструктивные и горнотехнические решения по предотвращению негативного влияния теплового фактора на устойчивость горных пород за счет применения типов и конструкций крепи, теплоизоляции, защитных покрытий.

Тепловой режим, который определяет возможные криогенно-технологические осложнения, обуславливает актуальность задачи по изучению влияния зоны оттаивания многолетнемерзлого массива горных пород на устойчивость горных выработок. Решение данной задачи базируется, как правило, на методах математического моделирования температурного поля в породном массиве (Курилко и др., 2010; Изаксон и др., 2000; Gambino et al., 2017 и др.).

В рамках научно-исследовательских работ, проводимых в Горном институте Кольского научного центра РАН, были выполнены исследования различных факторов, которые оказывают влияние на взаимодействие подземной атомной станции малой мощности с массивом многолетнемерзлых пород, включая изучение теплового фактора (Амосов и др., 2013; Мельников и др., 2015; Наумов и др., 2018; Орлов и др., 2017 и др.).

Целью настоящей работы является оценка эффективности пассивной системы тепловой защиты породного массива и изучение особенностей теплового режима элементов защитной конструкции (обделки) большепролетной камерной выработки.

## Материалы и методы

Рассматривается цилиндрическая трехмерная модель камерной выработки радиусом 8,1 м и высотой 23,4 м, которая в схематичном виде представлена на рис. 1.

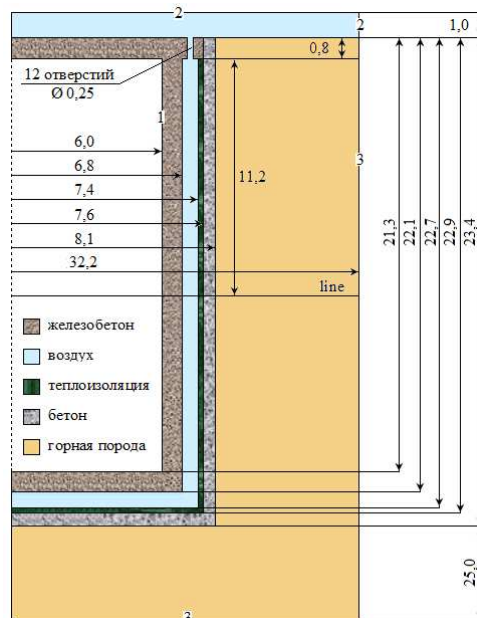


Рис. 1. Схема модели горной выработки:

1 – встроенная конструкция; 2 – выход по давлению воздушной среды; 3 – граница модели

Fig. 1. Scheme of the mine working model:

1 – the built-in structure; 2 – the output by the air pressure; 3 – the model boundary

<sup>1</sup> ТСН 31-323-2002. Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии : Территориальные строительные нормы Республики Саха (Якутия) : введен впервые : дата введения 2002-03-01 / разработан Научно-исследовательским геотехнологическим центром "Градиент" (г. Якутск) [и др.]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294846/4294846936.htm>.

Внутри горной выработки, размещенной в массиве ММГП с начальной температурой  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , расположена встроенная железобетонная конструкция (1), на внутренней поверхности которой задается постоянная температура  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Между встроенной конструкцией и защитной конструкцией (обделка) выработки имеется радиальный технологический канал шириной  $0,6\text{ м}$  с 12-ю отверстиями диаметром  $0,25\text{ м}$  в верхней части канала, заполненного воздухом, поступающим с температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  за счет естественной конвекции.

Материальный состав элементов расчетной модели характеризуют теплофизические свойства, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства твердых тел  
Table 1. Thermophysical properties of solids

Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость $c$ , Дж/(кг·К)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)
Железобетон	2 500	840	2,00
Теплоизоляция	100	1 200	0,03
Бетон	2 000	900	1,30
Горная порода	2 200	800	1,80

В рамках исследований рассмотрены различные варианты обделки выработки, которые в схематичном виде приведены на рис. 2.

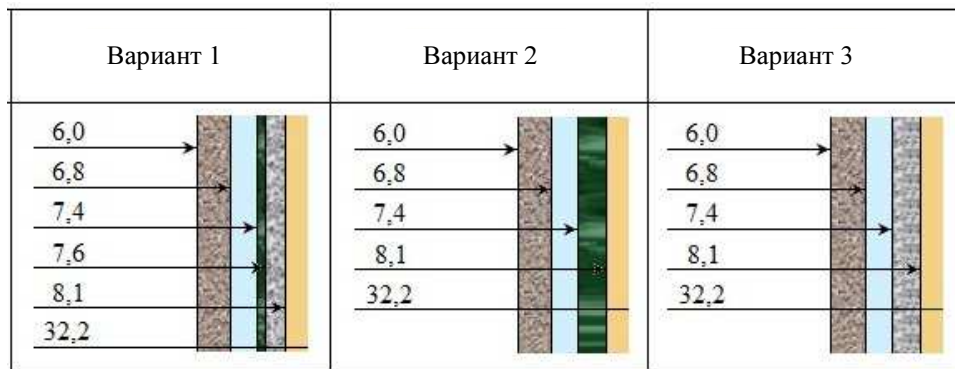


Рис. 2. Варианты защитной конструкции горной выработки  
Fig. 2. Options of protective structure of mine working

В качестве инструмента исследований был использован программный комплекс ANSYS FLUENT, позволяющий реализовать численное решение уравнения нестационарной теплопроводности для условий сопряженного теплообмена.

### Результаты и обсуждение

В результате проведения вычислительных экспериментов получены данные по тепловому состоянию породного массива и обделки выработки с течением времени. Установлено, что тепловая нагрузка на контур выработки приводит к изменению температуры горной породы, которое может оказывать негативное влияние на ее физико-механические свойства. Информация, полученная в результате проведения исследования, позволяет прогнозировать влияние зоны оттаивания многолетнемерзлого массива горных пород на устойчивость подземных сооружений и определить время, в течение которого необходимо проведение работ по тепловой защите породного массива. В частности, для модели с обделкой варианта 3 прогнозируемая продолжительность допустимого устойчивого состояния породного массива (до начала оттаивания приконтурной части массива при температуре на контуре выработки выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) составляет примерно 4 суток (рис. 3).

Очевидно, что с увеличением продолжительности теплового воздействия расширяется область теплового влияния выработки на породный массив. При этом размеры области существенно зависят от параметров защитной конструкции выработки. В качестве примера на рис. 4 показано температурное поле (в центральной плоскости модели) для вариантов 2 и 3 обделки через 183 суток теплового взаимодействия.

Говоря об эффективности защитной конструкции горной выработки как элемента пассивной системы тепловой защиты, следует отметить ее влияние на теплообмен в воздушном канале за счет свободной конвекции. Это влияние иллюстрируют расчетные данные по пространственному распределению температуры по линии *line* (рис. 1), приведенные на рис. 5.

Как показывает рис. 5, уменьшение теплопроводности защитной конструкции приводит к снижению интенсивности отвода тепла в горную породу. Это, в свою очередь, оказывает влияние на процесс теплообмена в воздушном канале за счет свободной конвекции. На рассматриваемое время (183 суток) в вариантах 2 и 3 обделки этот процесс практически стабилизируется при незначительном перепаде температуры в канале, который характеризует низкую интенсивность конвективного теплообмена. Очевидно, что при принятой конструкции воздушного канала для интенсификации теплообмена необходимо понижать температуру воздуха, поступающего в канал, и/или использовать вынужденную конвекцию за счет организации специальной системы регулирования теплового режима.

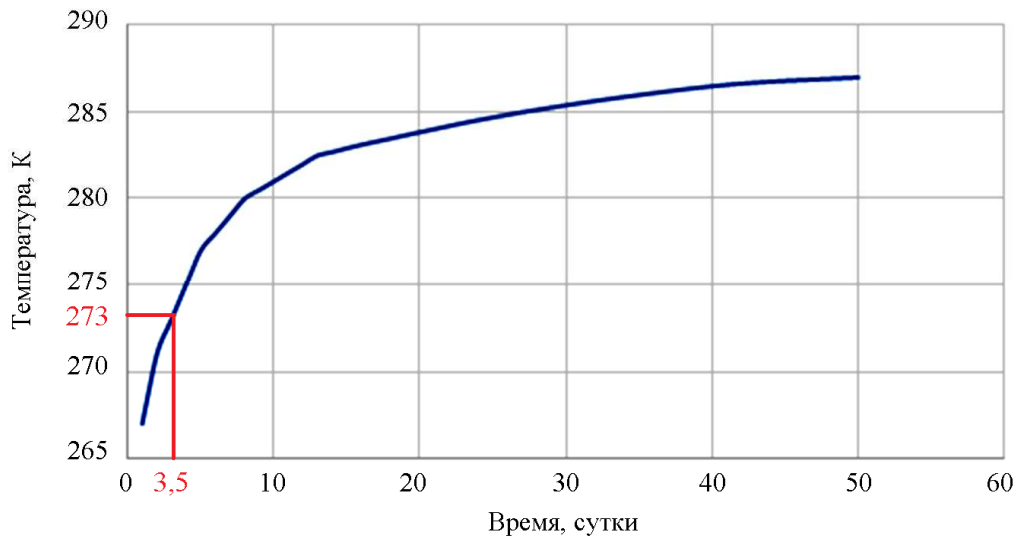


Рис. 3. Зависимость температуры на контуре горной выработки от продолжительности теплового воздействия

Fig. 3. The dependence of the temperature on working's contour on the thermal impact duration

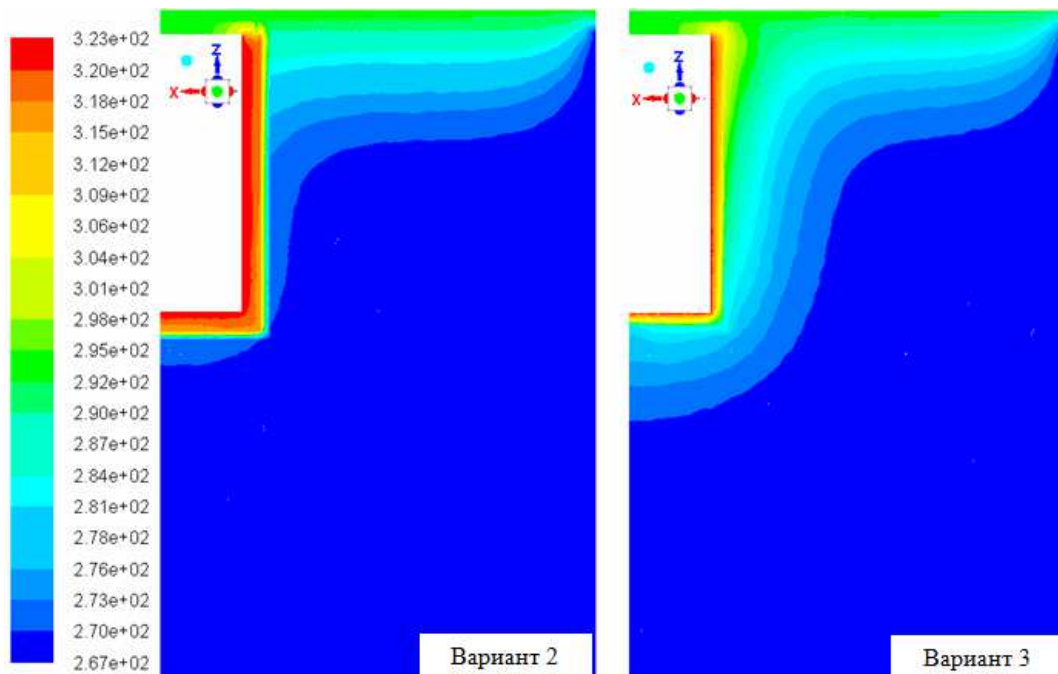


Рис. 4. Температурное поле в центральной плоскости модели (варианты 2 и 3 обделки) при тепловом взаимодействии горной выработки и породного массива в течение 183 суток

Fig. 4. Temperature field in the central plane of the model (options 2 and 3 of the protective structure) under the thermal interaction of mine working and rock massif during 183 days

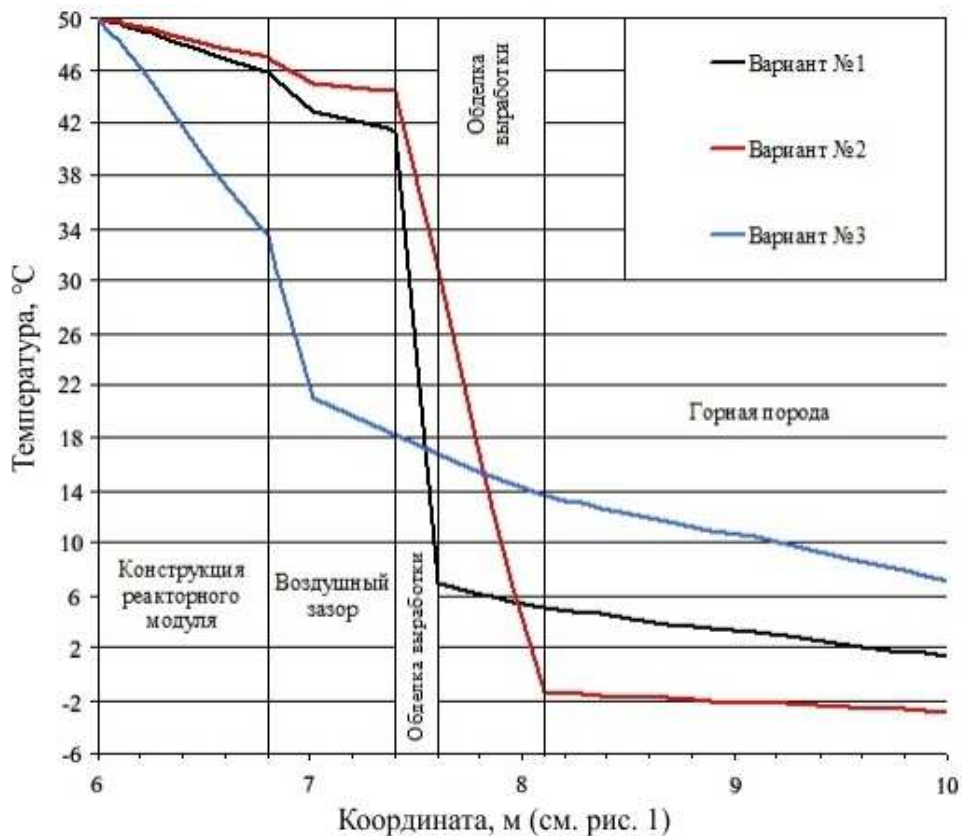


Рис. 5. Распределение температуры по линии *line* (рис. 1) через 183 суток теплового взаимодействия горной выработки и породного массива  
 Fig. 5. Temperature distribution along the *line* (Fig. 1) after 183 days of thermal interaction of mine working and rock massif

Для наглядного представления теплозащитных свойств обделки была выполнена оценка влияния ее термического сопротивления на глубину оттаивания породы. Для рассмотренных вариантов конструкции линейное термическое сопротивление  $R_T$  определялось по следующим формулам (Михеев и др., 1977):

– для однослойной конструкции (варианты 2 и 3)

$$R_T = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1};$$

– для двухслойной конструкции (вариант 1)

$$R_T = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{r_{2i}}{r_{1i}},$$

где  $\lambda_i$  – теплопроводность слоев конструкции, Вт/(м·К);  $r_1$  и  $r_2$  – внутренний и наружный радиус слоя соответственно, м.

Результаты выполненной оценки теплозащитных свойств защитной конструкции, приведенные на рис. 6, наглядно иллюстрируют зависимость глубины оттаивания горной породы (температура породы  $\geq 0$  °C) от линейного термического сопротивления обделки горной выработки.

Говоря о тепловых условиях работы защитной конструкции, следует отметить ее неравномерный нагрев (рис. 5). Под влиянием этого фактора в конструкции формируются термические напряжения, которые могут быть больше, чем от всех других нагрузок и воздействий (Асташкин, 2012; Вальцев, 1988). Такие напряжения в слое толщиной  $\Delta X$  пропорциональны градиенту температуры:

$$\text{grad } T = \Delta T / \Delta X,$$

где  $\Delta T = T_i - T_{i+1}$  – перепад температуры на слое толщиной  $\Delta X = X_{i+1} - X_i$ .

Для качественной оценки этого фактора в табл. 2 приведены расчетные данные по величине перепада и градиента температуры для рассмотренных вариантов обделки.

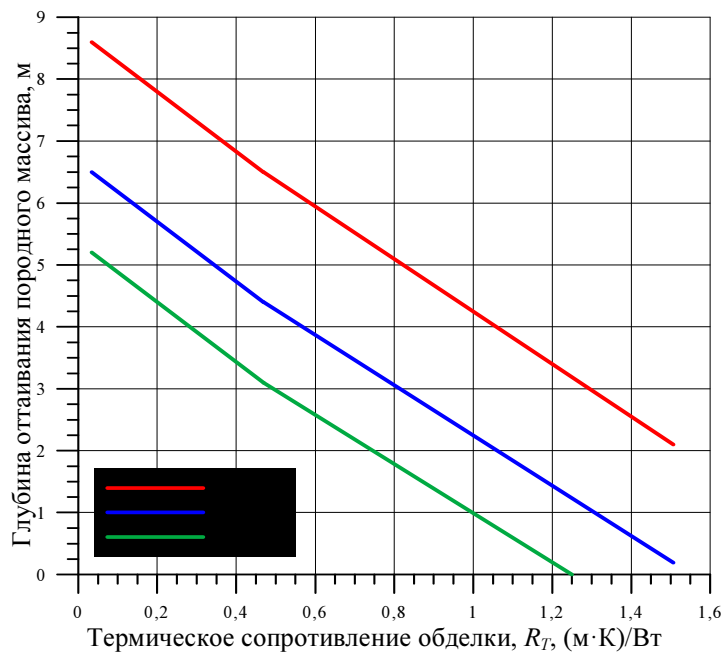


Рис. 6. Зависимость глубины оттаивания породного массива по линии *line* (рис. 1) от термического сопротивления обделки  $R_T$

Fig. 6. Dependence of the depth of thawing of the rock massif along the *line* (Fig. 1) on the thermal resistance of the protective structure  $R_T$

Таблица 2. Параметры температурного режима обделки горной выработки  
 Table 2. Parameters of a temperature regime of the protective structure of mine working

Продолжительность теплового воздействия, сут	Вариант расчетов			
	Вариант 1		Вариант 2	
	$\Delta X_{1-2} = 0,2 \text{ м}; \Delta X_{2-3} = 0,5 \text{ м}$		$\Delta X_{1-2} = 0,7 \text{ м}$	
	$0,469$		$1,506$	
	Линейное термическое сопротивление, (м·К)/Вт			
	$0,469$		$1,506$	
	Перепад температуры, °С			
	$\Delta T_{1-2}$	$\Delta T_{2-3}$	$\Delta T_{1-2}$	$\Delta T_{1-2}$
30	37,3	2,0	48,3	8,6
365	31,1	1,7	42,7	3,9
730	27,1	1,5	38,6	3,5
	Градиент температуры, °С/м			
	grad $T_{1-2}$	grad $T_{2-3}$	grad $T_{1-2}$	grad $T_{1-2}$
30	186,5	4,0	69,0	12,3
365	155,5	3,4	61,0	5,8
730	135,5	3,0	55,1	5,0

Приведенные данные показывают, что увеличение термического сопротивления обделки обуславливает повышение температурного градиента по толщине ее конструкции. При этом наблюдается уменьшение перепада температур для всех вариантов моделирования защитной конструкции с увеличением продолжительности теплового воздействия вследствие постепенного выравнивания температурного поля.

## Заключение

На основе математического моделирования процесса теплового взаимодействия большепролетной выработки камерного типа с вмещающим породным массивом показано, что выбор защитной конструкции (обделки) горной выработки позволяет исключить или ограничить область оттаивания породного массива на протяжении достаточно длительного времени, в течение которого могут быть реализованы горнотехнические системы регулирования теплового режима.

Прогнозируется, что при использовании обделки с линейным термическим сопротивлением более 1,2 (м·К)/Вт продолжительность сохранности криогенного состояния горной породы может превышать 183 суток. При уменьшении термического сопротивления защитной конструкции может потребоваться применение дополнительных способов регулирования температурного режима для обеспечения устойчивости горной выработки.

Показано, что конструктивное исполнение и материальный состав обделки оказывает значительное влияние на формирование градиентов температур по толщине различных элементов защитной конструкции, которые необходимо учитывать при оценке термонапряженного состояния обделки и устойчивости защитной конструкции.

При принятых параметрах технологического канала установлено слабое влияние теплообмена в канале за счет свободной конвекции на интенсивность теплового взаимодействия горной выработки и породного массива. Повышение эффективности конвективного теплообмена может быть достигнуто при использовании горнотехнических систем, позволяющих регулировать тепловой режим за счет изменения температуры и расхода воздуха, поступающего в технологический канал.

Результаты численных экспериментов показали целесообразность развития исследований, направленных на изучение влияния изменчивости теплофизических свойств различных литотипов горных пород на формирование температурного режима породного массива и обделки горной выработки.

## Библиографический список

- Амосов П. В., Новожилова Н. В. Аналитическая оценка теплового воздействия заглубленной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 4. С. 638–640.
- Асташкин В. М. Простая расчетная модель определения температурных напряжений в цилиндрической оболочке от градиента температур по толщине ее стенки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Строительство и архитектура. 2012. № 17 (276). С. 77–78.
- Вяльцев В. М. Прогноз и регулирование термонапряженного состояния горных выработок. М. : Недра, 1988. 200 с.
- Изаксон В. Ю., Петров Е. Е., Ковлеков И. И. Прогноз термомеханического состояния многолетнемерзлого массива. Якутск : ЯНЦ СО АН СССР, 1989. 103 с.
- Изаксон В. Ю., Слепцов В. И., Бандопадхай С. Математическое моделирование тепломассообмена в горных выработках Арктики / отв. ред. Е. Е. Петров. Новосибирск : Наука, 2000. 119 с.
- Курилко А. С., Иудин М. М. Методы расчета термомеханического взаимодействия многолетнемерзлого породного массива и крепи горных выработок, пройденных в условиях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 11. С. 311–315.
- Мельников Н. Н., Амосов П. В., Гусак С. А., Новожилова Н. В. [и др.]. Тепловое воздействие подземной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы // Криосфера Земли. 2015. Т. 19, № 2. С. 45–51.
- Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М. : Энергия, 1977. 343 с.
- Наумов В. А., Гусак С. А., Наумов А. В. Атомные станции малой мощности для энергоснабжения арктических регионов: оценка радиоактивности отработавшего ядерного топлива // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2018. № 1. С. 75–86. DOI: 10.26583/npe.2018.1.08.
- Орлов А. О., Смирнов Ю. Г., Гусак С. А. Основные методические принципы обеспечения безопасности строительства подземных комплексов атомных станций малой мощности в условиях российской Арктики // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2017. № 5. С. 31–38.
- Gambino G. F., Harrison J. P. Rock engineering design in frozen and thawing rock: Current approaches and future directions // Procedia Engineering. 2017. V. 191. P. 656-665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.229>.

## References

- Amosov, P. V., Novozhilova, N. V. 2013. Analytical evaluation of thermal impact of subsurface small nuclear power plant on the permafrost rocks. *Vestnik of MGTU*, 16(4), pp. 638–640. (In Russ.)
- Astashkin, V. M. 2012. A simple simulation model for determining of thermal stress in cylindrical shell on the temperature gradient across the thickness of the walls. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*, 17(276), pp. 77–78. (In Russ.)
- Vyal'tsev, V. M. 1988. The prediction and regulation of the thermal stress state of the mine workings. Moscow. (In Russ.)

- Izakson, V. Yu., Petrov, E. E., Kovlekov, I. I. 1989. Prediction of the thermomechanical state of permafrost rock mass. Yakutsk. (In Russ.)
- Izakson, V. Yu., Sleptsov, V. I., Bandopadkhay, S. 2000. Mathematical modeling of heat and mass transfer in mine working of the Arctic. Novosibirsk. (In Russ.)
- Kurilko, A. S., Iudin, M. M. 2010. The methods of calculation of thermomechanical interaction of permafrost rock mass and supports of mining openings developed in cryolithic zone. *Mining informational and analytical bulletin*, 11, pp. 311–315. (In Russ.)
- Melnikov, N. N., Amosov, P. V., Gusak, S. A., Novozhilova, N. V. et al. 2015. Thermal impact of underground small nuclear power plant on the permafrost rocks. *Earth's Cryosphere*, 19(2), pp. 45–51. (In Russ.)
- Mikheev, M. A., Mikheeva, I. M. 1977. Basics of heat transfer. Moscow. (In Russ.)
- Naumov, V. A., Gusak, S. A., Naumov, A. V. 2018. Small nuclear power plants for power supply to the Arctic regions: Spent nuclear fuel radioactivity assessment. *Nuclear Energy and Technology*, 1, pp. 75–86. DOI: 10.26583/npe.2018.1.08. (In Russ.)
- Orlov, A. O., Smirnov, Yu. G., Gusak, S. A. 2017. Basic methodological principles for ensuring the safe construction of underground complexes of small nuclear power plants in the Russian Arctic. *Izvestiya vysshyh uchebnyh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 5, pp. 31–38. (In Russ.)
- Gambino, G. F., Harrison, J. P. 2017. Rock engineering design in frozen and thawing rock: Current approaches and future directions. *Procedia Engineering*, 191, pp. 656–665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.229>.

#### Сведения об авторах

**Гусак Сергей Андреевич** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук, доцент; e-mail: [gusnat52@mail.ru](mailto:gusnat52@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5028-326X>

**Sergey A. Gusak** – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: [gusnat52@mail.ru](mailto:gusnat52@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5028-326X>

**Орлов Александр Орестович** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: [aleor@goi.kolasc.net.ru](mailto:aleor@goi.kolasc.net.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5387-1262>

**Alexander O. Orlov** – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: [aleor@goi.kolasc.net.ru](mailto:aleor@goi.kolasc.net.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5387-1262>

**Смирнов Юрий Геннадьевич** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: [smirnov@goi.kolasc.net.ru](mailto:smirnov@goi.kolasc.net.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6100-2032>

**Yury G. Smirnov** – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: [smirnov@goi.kolasc.net.ru](mailto:smirnov@goi.kolasc.net.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6100-2032>

**Бирюков Валерий Валентинович** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: [birukov@goi.kolasc.net.ru](mailto:birukov@goi.kolasc.net.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0495-2928>

**Valery V. Biryukov** – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: [birukov@goi.kolasc.net.ru](mailto:birukov@goi.kolasc.net.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0495-2928>

**Паливода Анита Александровна** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, инженер; e-mail: [89533072508@mail.ru](mailto:89533072508@mail.ru)

**Anita A. Palivoda** – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Engineer; e-mail: [89533072508@mail.ru](mailto:89533072508@mail.ru)