

5. Андрейко С.С., Калугин П.А., Щерба В.Я. Газодинамические явления в калийных рудниках: Генезис, прогноз и управление / под. ред. В.Я. Прушака. – Минск: Выш. шк., 2000. – 335 с.: ил.
6. Андрейко С.С. Газодинамические явления в калийных рудниках: методы прогнозирования и способы предотвращения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во. ПГТУ, 2007. – 208 с.
7. Андрейко С.С., Иванов О.В., Литвиновская Н.А. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений из почвы при проходке подготовительных выработок в подработанном массиве соляных пород. – Пермь: изд-во ПНИПУ, 2015. – 159 с.
8. Андрейко С.С., Иванов О.В., Нестеров Е.А. Борьба с газодинамическими явлениями при разработке Верхнекамского и Старобинского месторождений калийных солей // Науч. исслед. и инновации. – 2009. – Т. 3, № 4. – С. 34-37.
9. Андрейко С.С., Литвиновская Н.А. Локальный прогноз зон, опасных по газодинамическим явлениям из почвы горных выработок пласта АБ на южной части шахтного поля БКПРУ-4 Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 4. – С. 205-211.

УДК 66.045.3

DOI:10.7242/echo.2025.4.8

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Я.Д. Кузнецов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Выполнен сравнительный анализ теплофизических свойств основных классов теплоизоляционных материалов с выделением ключевых зависимостей. Экспериментальная часть исследования включает лабораторные испытания образцов конструкционного бетона, композиционного материала на бетонной основе с теплоизоляционной прослойкой и отдельного теплоизоляционного компонента. Полученные результаты дают основу для выбора и проектирования эффективных теплоизоляционных решений при креплении горных выработках в условиях повышенных температур массива горных пород.

Ключевые слова: тепловой режим, теплоизоляция, композиционный материал, теплофизические свойства, теплоемкость, теплопроводность, плотность.

Следствием разработки месторождений на большой глубине и эксплуатации высокопроизводительной техники является прогрессирующий нагрев рудничной атмосферы, что ухудшает микроклиматические условия в рабочих зонах [1]. Ярким примером являются условия шахты «Глубокая» рудника «Скалистый» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», где температура массива способна достигать 49,4°С при глубине ведения горных работ более 1500 метров. В таких экстремальных условиях традиционные горнотехнические методы охлаждения воздуха не способны сильно повлиять на снижение температуры, что может привести к значительному ухудшению микроклимата в выработках, снижению производительности труда и созданию прямых угроз для безопасности горнорабочих.

Согласно требованиям пункта 156 «Правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», температура воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок и на рабочих местах с постоянным присутствием персонала не должна превышать +26°С [2]. При температуре воздуха свыше допустимой должно предусматриваться его охлаждение.

Ключевым направлением в решении проблемы повышенной температуры воздуха является применение специальных строительных материалов крепи и теплоизоляции горных выработок. Эффективность таких материалов, включающих композиционные структуры на основе бетона с интегрированной теплоизоляционной прослойкой,

напрямую зависит от их теплофизических характеристик – теплопроводности, теплоемкости и плотности. Именно эти параметры позволяют проводить достоверное моделирование тепловых процессов, происходящих в горных выработках.

В этой связи особую актуальность приобретает комплексная оценка теплофизических свойств современных теплоизоляционных материалов, определяющая их функциональную эффективность и область рационального применения в горно-геологических условиях глубоких горизонтов. Особый интерес представляет сравнительный анализ их теплофизических свойств, которые непосредственно влияют на эффективность их применения.

Сравнительный анализ теплофизических свойств основных классов теплоизоляционных материалов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства теплоизоляционных материалов

Материал, источник	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Плотность, кг/м ³
Ячеистый вспененный карбамидоформальдегидный пенопласт, [3]	0,03-0,04	-	10-25
Вспученный перлит, [4]	0,040-0,050	900	140-240
Пенополиуретан, [3]	0,041	1470	80
Перлитопластбетон, [3]	0,041	1050	200
Маты прошивные из супертонкого стекловолокна без связующего, [5]	0,044	-	45-50
Плиты минераловатные на синтетическом связующем, [6]	0,047-0,054	-	75-225
Пенополистирол, [3]	0,049	1340	10
Полистиролбетон, [3]	0,052-0,054	1060	200-500
Плиты минераловатные, [3]	0,07	-	200
Изделия из вспученного перлита на битумном связующем, [3]	0,087	1680	300
Пеностекло, [7]	0,093	-	230
Керамзитобетон беспесчаный, [3]	0,135	840	700
Вермикулитобетон, [3]	0,21	840	800
Туфобетон, [3]	0,64	840	1800

Проведенный анализ выявил четкую классификацию материалов по теплопроводности:

1. Высокоэффективные теплоизоляции (0,03–0,05 Вт/(м·°С)), к которым относятся ячеистый пенопласт, вспученный перлит, пенополиуретан, перлитопластбетон, прошивные маты из стекловолокна и пенополистирол.
2. Материалы средней эффективности (0,05–0,1 Вт/(м·°С)), такие как плиты минераловатные, полистиролбетон, вспученный перлит на битумном связующем, пеностекло.
3. Материалы конструкционно-теплоизоляционные (более 0,1 Вт/(м·°С)) – керамзитобетон, вермикулитобетон и туфобетон.

Установлена обратная зависимость между плотностью и теплоизоляционными свойствами: минимальные значения теплопроводности характерны для материалов с невысокой плотностью.

Полученные данные позволяют целенаправленно выбирать материалы для теплоизоляции горных выработок, оптимизируя соотношение между теплофизическими характеристиками, несущей способностью и эксплуатационной стойкостью. Перспективным направлением будет являться применение композиционных структур на бетонной основе, сочетающих высокие прочностные качества и низкие теплопроводящие свойства.

Экспериментальные исследования проведены на образцах, представляющих стандартные и перспективные решения для крепления горных выработок: монолитный бетон (конструкционный материал) и бетон с интегрированной теплоизоляционной прослойкой (композиционный материал). Для испытания изготовлены образцы в форме параллелепипедов (36×36×70 мм) и дисков (Ø46 мм, толщиной 7,8-29,2 мм). Характерные образцы представлены на рис. 1.

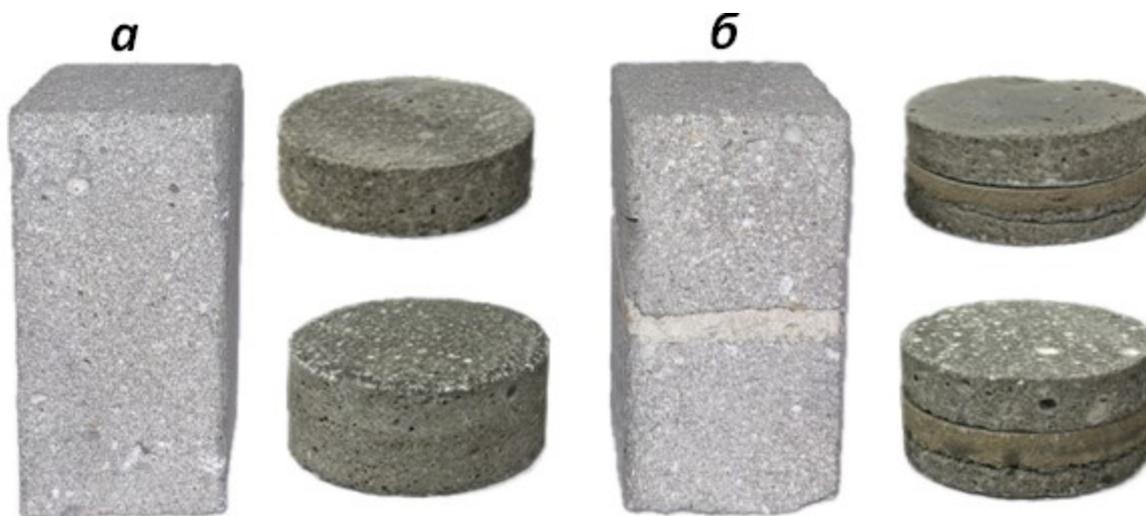


Рис. 1. Образцы материалов для определения теплофизических свойств: (а) конструкционный бетон, (б) композиционный материал на бетонной основе с теплоизолирующей прослойкой

Определение удельной теплоемкости проводилось методом сравнения кривых охлаждения исследуемого образца и медного эталона [9]. После нагрева до 70°C в сушильном шкафу и стабилизации температуры образцы охлаждались в естественных условиях с регистрацией их температуры. Расчет удельной теплоемкости выполнялся по формуле, учитывающей массу образца и эталона, а также параметры скорости их остывания:

$$c_n = c_{\text{эт}} \frac{m_{\text{эт}}}{m_n} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{\text{эт}}}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_n}, \quad (1)$$

где $c_{\text{эт}}$ – удельная теплоемкость эталона; m_n , $m_{\text{эт}}$ – масса исследуемого образца и эталона; $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{\text{эт}}$, $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_n$ – скорости остывания исследуемого образца и эталона.

В процессе остывания с интервалом 1 минуту фиксировалась температура образца и эталона с помощью регистратора ИТП-МГ4.03 «ПОТОК», при этом реги-

стрировалась температура окружающего воздуха метеостанцией Kestrel Drop D2. По полученным данным строились графики скорости остывания образца и эталона, отражающие зависимость разницы температур образца и окружающей среды от времени.

Коэффициент теплопроводности определялся в квазистационарном тепловом режиме на установке, оснащенной тепломером. Образец помещался между медными дисками, при этом создавался стабильный тепловой поток. В ходе эксперимента измерялись плотность теплового потока и перепад температур на образце.

Согласно закону теплопроводности Фурье общее тепловое сопротивление системы определяется как:

$$R_t = R_{\text{обр}} + R_{\text{конт}} = \frac{\Delta T}{q}, \quad (2)$$

где $R_{\text{обр}}$ – тепловое сопротивление образца; $R_{\text{конт}}$ – тепловое сопротивление на контактах; ΔT – разница температуры на нижней и верхней гранях образца; q – тепловой поток.

Выражение (2) можно преобразовать к виду, умножив при этом обе его части на площадь поперечного сечения участка S :

$$\frac{\Delta T}{q} = \frac{\Delta x_{\text{обр}}}{\lambda_{\text{обр}}} + \frac{\Delta x_{\text{конт}}}{\lambda_{\text{конт}}}, \quad (3)$$

где Δx – длина участка, λ – коэффициент теплопроводности материала.

Если считать, что суммарное тепловое сопротивление контактов и датчика плотности теплового потока величина постоянная при измерениях образцов различной толщины, то выражение (3) будет представлять собой уравнение прямого вида:

$$y = k\Delta x_{\text{обр}} + b, \quad (4)$$

где $y = \Delta T/q$, $k = 1/\lambda_{\text{обр}}$, $b = \Delta x_{\text{конт}}/\lambda_{\text{конт}}$.

Для вычисления коэффициента теплопроводности строилась зависимость отношения $\Delta T/q$ от толщины образца $\Delta x_{\text{обр}}$. В таком случае коэффициент теплопроводности исследуемого материала $\lambda_{\text{обр}}$ определялся как величина, обратная коэффициенту k , характеризующему наклон экспериментальной кривой. Для композиционного материала определялась кажущаяся теплопроводность как всей структуры, так и теплоизоляционного компонента в отдельности. Понятие кажущейся теплопроводности применено в связи с особенностью конструкции исследуемых образцов, где теплоизоляционный слой сохранял постоянную толщину (5,3 мм), а бетонный слой варьировался. Данный параметр является характеристикой, учитывающей вклад отдельных компонентов композиционной структуры в общее термическое сопротивление при конкретной геометрии образца, и не представляет собой фундаментальное свойство материала.

Плотность материалов определялась стандартным методом через измерение массы на электронных лабораторных весах и вычисление объема по геометрическим размерам:

$$\rho_{\text{обр}} = \frac{m_{\text{обр}}}{V_{\text{обр}}}, \quad (5)$$

где $m_{\text{обр}}$ – масса образца; $V_{\text{обр}}$ – объем образца.

Сводные результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты определения теплофизических свойств материалов

Параметр	Монолитный бетон	Композиционный материал	Теплоизоляционный компонент
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	988,9 (±2,0)	1006,8 (±17,2)	–
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	1,91 (±0,01)	0,69* (±0,06)	0,25* (±0,03)
Плотность, кг/м ³	1915 (±65)	1755 (±115)	790

* – кажущийся коэффициент теплопроводности (при толщине образца 20,0 мм и слое теплоизоляции в нем, равном 5,3 мм)

Экспериментальные исследования теплофизических свойств материалов выявили следующие результаты. Композиционный материал характеризуется незначительно более высокой теплоемкостью (+1,8%), что может быть обусловлено наличием теплоизоляционного компонента. Наблюдается существенное различие в коэффициенте теплопроводности: кажущаяся теплопроводность композиционного материала (0,69 Вт/(м·°С)) более чем в 2,8 раза ниже, чем у монолитного бетона (1,91 Вт/(м·°С)). Низкая кажущаяся теплопроводность изоляционного компонента (0,25 Вт/(м·°С)) является ключевым фактором обеспечения этого эффекта. Полученные значения плотности сопоставимы с составом материалов – монолитный бетон имеет наибольшую плотность, а композиционный материал характеризуется меньшей плотностью за счет менее плотного теплоизоляционного слоя.

Установлено, что композиционный материал на основе бетона с теплоизоляционной прослойкой обладает сопоставимой теплоемкостью, но значительно более низкой теплопроводностью по сравнению с монолитным бетоном. Полученные результаты подтверждают перспективность применения композиционных материалов в качестве теплоизолирующей крепи глубоких горных выработок для улучшения микроклиматических условий.

Выводы

В ходе проведенных исследований подтвердилась перспективность применения композиционных материалов в условиях подземных выработок. Полученные результаты свидетельствуют о значительном улучшении теплофизических характеристик по сравнению с традиционными конструкционными материалами.

Разработанный композиционный материал продемонстрировал высокую эффективность в снижении теплопередачи, что особенно важно для глубоких горизонтов с высокими температурами массива. Его использование в конструкции крепи предположительно позволит существенно улучшить микроклиматические условия в подземных выработках.

Для полномасштабного внедрения рекомендуется проведение дополнительных исследований и математического моделирования с учетом комплексного воздействия шахтных факторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев А.В. Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: дис. ... к.т.н.; 25.00.20; защищена 21.06.2013 / Зайцев Артем Вячеславович. – Пермь, 2013. – 168 с.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
3. Зарубина, Л.П. Теплоизоляция зданий и сооружений. материалы и технологии. – 2-е изд. – СПб: БХВ-Петербург, 2012. – 406 с.: ил.
4. ISO 10456:2007. Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design and procedures for determining declared and design thermal values. – Geneva: International Organization for Standardization, 2007. – 42 p.
5. Тепловая изоляция / Г.Ф. Кузнецов [и др.]. – 4-е изд., доп. и перераб. – М.: Стройиздат, 1985. – 421 с.: ил. – (Справочник строителя).
6. Бобров Ю.Л., Овчаренко Е.Г., Шойхет Б.М., Петухова Е.Ю. Теплоизоляционные материалы и конструкции: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 265 с.: ил.
7. Хоменко В.П., Фаренюк Г.Г. Справочник по теплозащите зданий. – Киев: Будівельник, 1986. – 215 с.: ил.
8. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003: утв. приказом Минрегиона России 30.06.2012, № 283: введ. 2013-07-01. – М., 2012. – 96 с.
9. Киров С.А. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. Учеб. пособие. – М.: ООП Физич. ф-т МГУ, 2012. – 52 с.
10. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика: учеб. пособие: для вузов.– 5-е изд. испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.

УДК 622.831.322

DOI:10.7242/echo.2025.4.9

**ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОНОСНОСТИ
ПО СВЯЗАННЫМ ГАЗАМ ПЛАСТА Б СМЕШАННОГО СОСТАВА
В УСЛОВИЯХ УСТЬ-ЯЙВИНСКОГО РУДНИКА**

Е.А. Нестеров

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье приведены результаты исследований газоносности пород пласта Б смешанного состава по связанным газам, выполненные методом сухой механической дезинтеграции и хроматографии в лабораторных условиях.

Ключевые слова: газоносность, связанные газы, компонентный состав, сильвинит, карналлитовая порода, смешанные соли.

Введение

Продуктивный пласт АБ является одним из основных при разработке Верхнекамского месторождения. Он находится на границе сильвинитовой и карналлитовых зон геологического разреза месторождения. Пласт А представлен полосчатым сильвинитом, а пласт Б – карналлитовой породой или сильвинитом. Отработка пласта АБ возможна в том случае, когда пласт Б представлен пестрым сильвинитом. Однако участки распространения смешанных солей, когда пласт сложен и сильвинитом и карналлитовой породой, отмечены на нескольких шахтных полях месторождения и вызывают вопросы по поводу их отработки в силу того, что работы требуется вести согласно проекту организации работ [1]. В зависимости от процентного содержания карналлита по площади сечения горной выработки применяется бурение разведоч-