Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-200-205

Изменение энтальпии вентиляционной струи при работе дизельной техники в подземных сооружениях криолитозоны

В.Ю. Панков ✉
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация
✉ pankov1956@inbox.ru

Резюме: Цель работы – определение влияния дизельной техники на тепловой режим горных выработок подземных сооружений криолитозоны. В статье проанализированы литературные источники, где утверждается, что в механизированных шахтах и рудниках дизельная техника является определяющим фактором формирования теплового режима, причем существует прямая зависимость между количеством работающих машин, их мощностью и приращением температуры в горной выработке. Поскольку отдельные литературные данные противоречат друг другу, были проведены исследования и получены расчетные зависимости для определения приращения энтальпии и температуры в подземных сооружениях при работе дизельных машин и механизмов. На основании качественного и количественного анализа установлено, что приращение энтальпии (температуры) воздуха в горных выработках подземных сооружений не зависит от мощности и количества действующих дизельных установок и полностью определяется начальной температурой вентиляционной струи и термодинамическим коэффициентом полезного действия (КПД) двигателей. Установлено, что приращение температуры главным образом определяется КПД действующих дизельных установок и увеличивается при повышении начальной температуры вентиляционной струи: причем, чем выше КПД установки, тем меньше влияние начальной температуры воздуха на тепловой режим в выработке. Показано, что даже при минимальном термодинамическом КПД дизельной техники, равном 0,4, приращение температуры, как правило, не превышает 6,0 °С при начальной положительной температуре воздуха и 5,0 °С при начальной отрицательной температуре воздуха в горной выработке.

Ключевые слова: подземное сооружение, горная выработка, тепловой режим, дизельная техника, вентиляция, энтальпия, температура, источник тепла, метод расчета

Благодарности: Автор выражает благодарность профессору А.Ф. Галкину за идею работы и помощь в подготовке статьи к публикации.

Для цитирования: Панков В.Ю. Изменение энтальпии вентиляционной струи при работе дизельной техники в подземных сооружениях криолитозоны. *Горная промышленность.* 2026;(5):200–205. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-200-205

Changes in the enthalpy of the ventilation stream during operation of diesel equipment in underground facilities in the permafrost zone

V.Yu. Pankov ✉
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation
✉ pankov1956@inbox.ru

Abstract: The purpose of this work was to determine the effect of diesel equipment on the thermal regime of mine workings of underground operations in the permafrost zone. The paper analyzes literature sources which state that in mechanized mines and mines, diesel equipment is a determining factor in formation of the thermal regime, and there is a direct relationship between the number of operating machines, their power and the increment of temperature in the mine working. Since certain literary data contradict each other, studies were carried out and calculated dependencies were obtained to determine the increment of enthalpy and temperature in underground facilities during operation of diesel machines and mechanisms. On the basis of qualitative and quantitative analyses, it was established that an increment in the enthalpy (temperature) of the air in the mine workings of underground facilities does not depend on the power and the number of operating diesel units and is fully determined by the initial temperature of the ventilation stream and the thermodynamic efficiency of the engines. It has been established that the increment in the temperature is mainly determined by the efficiency of the operating diesel units, and it

increases with an increase in the initial temperature of the ventilation stream: moreover, the higher the efficiency of the units, the smaller is the effect of the initial air temperature on the thermal regime in the mine working. It is shown that even with the minimum thermodynamic efficiency of the diesel equipment equal to 0.4, the temperature increment cannot exceed 6.0°C at the initial positive air temperature, and 5.0°C at the initial negative air temperature in the mine working.

Keywords: underground structure, mine working, thermal regime, diesel equipment, ventilation, enthalpy, temperature, heat source, calculation method

Acknowledgements: The author expresses his gratitude to Professor A.F. Galkin for the idea behind this work and for his assistance in preparing the article for publication.

For citation: Pankov V.Yu. Changes in the enthalpy of the ventilation stream during operation of diesel equipment in underground facilities in the permafrost zone. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):200–205. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-200-205

Введение

Теплосодержание (или энтальпия) влажного воздуха – это количество теплоты, необходимое для нагрева 1 кг сухого воздуха и содержащихся в нем водяных паров от начальной до текущей температуры. В технической термодинамике эта величина измеряется в килоджоулях на килограмм сухого воздуха (кДж/кг). В подземном сооружении при работе дизельных установок, например машин и механизмов с дизельным приводом, энтальпия вентиляционного воздуха будет изменяться за счет тепловыделений от дизельных установок. Это приращение обычно рассматривается как приращение за счет действия абсолютных источников тепловыделения [1]. То есть считается, что влагосодержание воздуха в сооружении за счет работы дизельных установок не изменяется. Обычно для приращения температуры от дизельных установок, используются два основных способа учета образования дополнительного количества тепла: а) через КПД дизельных установок, например [2], и б) напрямую, через теплоту сгорания дизельного топлива, например [3]. Сравнительной точности определения по двум методикам в литературе не найдено. Но, считая, что первый способ косвенно учитывает и теплоту сгорания дизельного топлива, можно считать его вполне приемлемым для инженерных расчетов.

В литературе имеются разноречивые сведения о влиянии дизельных установок на тепловой режим подземных сооружений. Например, в статье [4] приведены графики, согласно которым приращение температуры от работы дизельных установок может превышать 20 °С. Причем, чем больше уровень тепловыделений дизельных установок, тем больше нагрев температуры. По всей вероятности, это вызвано объединением всех типов абсолютных источников в одно целое, что противоречит правилам безопасности, которые регламентируют количество воздуха, подаваемого в подземное сооружение, при использовании дизельной техники. В работе [5] утверждается, что с увеличением количества работающих в выработке дизельных машин температура в забое увеличивается пропорционально их мощности. В работах [6; 7], наоборот, доказывается, что приращение от работы дизельной техники в рудниках криолитозоны – величина приблизительно постоянная, не превышающая нескольких градусов Цельсия и от количества одновременно работающей техники не зависит. То есть единого мнения среди специалистов, занимающихся прогнозом и регулированием теплового режима подземных сооружений, в этом вопросе нет. В то же время никто не отрицает факт, что собственно тепловыделения от абсолютных источников играют важную роль в формировании теплового режима рудников криолитозоны и оказывают существенное влияние например на устойчивость горных пород, которая зависит от температуры воздуха в выработках. Важность учета абсолютных источников тепла (в том числе дизельных машин и механизмов) в формировании теплового режима в подземных сооружениях криолитозоны отмечается многими исследователями в области горной теплофизики и инженерного мерзлотоведения [8; 9].

Целью настоящей работы было определение влияния дизельной техники на тепловой режим подземных сооружений криолитозоны, в частности, высокомеханизированных рудников криолитозоны, в которых активно используется дизельная техника при погрузке и доставке руды и материалов.

Материалы и методы

Тепловой баланс подземного сооружения при наличии работающей дизельной техники запишем в виде следующего равенства, Вт,

$$d(GJ) = q, \quad (1)$$

где G – расход воздуха, кг/с; J – энтальпия воздуха, Дж/кг; q – суммарные тепловыделения от дизельных установок, Дж/с.

Считая, что расход воздуха не изменяется в период проветривания объекта, можно записать следующее балансовое уравнение, Вт:

$$GdJ = q. \quad (2)$$

Массовый расход воздуха определяется по формуле, кг/с,

$$G = \gamma(t,d)Q\,, \quad (3)$$

где $\gamma(t,d)$ – плотность воздуха, являющаяся функцией температуры t и влажности d, определение которой для подземных сооружений можно найти в работах [10; 11]; Q – нормативный объемный расход воздуха на проветривание, м³/с.

С учетом выражения (3) формулу для определения приращения энтальпии в зависимости от тепловыделения дизеля можно записать в виде, Дж/кг:

$$dJ = q/Q\gamma(t,d). \quad (4)$$

Тепловыделения при работе дизельной установки представим как часть от ее мощности, Вт,

$$q = nq_0\,, \quad (5)$$

где n – коэффициент, характеризующий количество тепла, которое пошло на нагревание воздуха, в зависимости от мощности двигателя, д.е.; q_0 – мощность работающих дизельных установок, Вт.

Согласно правилам безопасности поступление свежего воздуха на объект с работающей дизельной установкой по разжижению вредных выбросов до нормативных ПДК определяется как величина массового расхода воздуха на единицу мощности дизельной установки, м³/с:

$$Q = \beta q_0 , \quad (6)$$

где β – нормативная величина расхода воздуха на 1 Вт (на 1 л.с.) мощности дизельной техники (обычно 5,0 или 3,5 м³/мин на 1 л.с., что соответствует 0,1133 и 0,0861 м³/с на кВт в зависимости от наличия фильтра-поглотителя вредных газов в дизельной установке и используемого вида топлива), м³/с*Вт.

Подставляя выражения (5) и (6) в (4), получим уравнение для приращения энтальпии, Дж/кг:

$$dJ = n/\beta\gamma(t,d). \quad (7)$$

Если в расчет ввести термодинамический КПД (η) дизельного двигателя, то можно считать

$$n = k(1-\eta)/\eta, \quad (8)$$

где k – коэффициент, определяемый экспериментальным путем (показывающий, какая доля энергии от сгорания топлива пошла непосредственно на нагревание воздуха в выработке), д.е.

Анализируя литературные данные, в оценочных расчетах можно принять диапазон изменения данного параметра от 0,3 до 0,6. Далее нами в расчетах этот параметр считался постоянным, равным 0,45.

Очевидно, что точно рассчитать часть энергии сгорания топлива, которая превращается в тепло, отдаваемое двигателем в окружающую среду затруднительно, особенно учитывая неравномерное потребление энергии (расход топлива) во времени при выполнении различных технологических операций. Поэтому наиболее приемлемым в таких случаях является использование не детерминированных значений исходных данных, а вероятного диапазона их изменения в рассматриваемом процессе. Этот подход и был применен нами в дальнейших расчетах. В частности, термодинамический КПД изменялся в диапазоне от 0,4 до 0,7. В среднем же все литературные источники дают цифру тепловых потерь дизельных машин и механизмов, близкую к 50% от общей энергии сгорания топлива. Список литературных источников по данной тематике достаточно обширен, как и конкретные данные по величине «η», и может быть легко представлен любым вариантом искусственного интеллекта по запросу пользователя.

Перейдя от дифференциала к конечным разностям, получим выражение для определения приращения энтальпии в сооружении при работе любого количества дизельной техники, Дж/кг:

$$\Delta J = = k(1-\eta)/\eta\beta\gamma(t,d). \quad (9)$$

Приращение температуры воздуха в сооружении при работе дизельных установок приближенно может быть найдено из следующих соображений.

В инженерной практике принято определять энтальпию по простой формуле, Дж/кг:

$$J = ct + rd = (1{,}005t + 2500d) * 10^3 , \quad (10)$$

где c – удельная теплоемкость сухого воздуха, Дж/кгК; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; C – удельная теплоемкость водяного пара, Дж/кгК.

Используя данную зависимость и считая, что дополнительного увлажнения воздуха при работе дизельных установок не происходит, получим следующую простую зависимость для определения приращений температуры в сооружении за счет тепловыделений от работы дизельных установок (принято, что теплоемкость воздуха измеряется в кДж/кгК, т.к. параметр «β» измеряется в м³/с на кВт) , °С:

$$\Delta T = k(1-\eta)/\eta(\beta\gamma(t,d)). \quad (11)$$

Как видно из формул (9) и (11), основным переменным параметром для конкретной дизельной машины, который определяет приращение энтальпии и температуры в выработке, является удельный вес (плотность) воздуха. При этом известно, что влияние влажности на плотность воздуха, особенно в холодном климате, очень мало и может не учитываться во многих инженерных задачах. В работах [11; 12] приводятся количественные данные, подтверждающие этот вывод. Например, плотность влажного воздуха при нуле градусов Цельсия всего на 0,23% меньше, чем у сухого воздуха при этой же температуре. При температуре +4 °С при повышении относительной влажности с 20 до 100% плотность воздуха уменьшается менее чем на 1%. Для сравнения, изменение температуры воздуха от –20 до –10 °С при постоянном давлении изменяет его плотность примерно на 4%, что значительно превышает влияние влажности.

Учитывая эти особенности влажного воздуха, мы получили простую аналитическую зависимость для определения плотности воздуха при характерных значениях влажности воздуха в подземных сооружениях криолитозоны, действительную в пределах изменения температур от –30 до +30 °С, кг/м³:

$$\gamma(t,d) = 1.3 - 4.7 * t * 10^{-3}. \quad (12)$$

Данная формула в дальнейшем использовалась при численных расчетах и построении графиков.

Результаты и их обсуждение

Прежде всего, чтобы оценить достоверность результатов исследований, приведенных во введении [4; 5], проанализируем формулу (9). Анализ данного выражения позволяет сделать важный вывод: приращение теплосодержания воздуха в инженерных сооружениях при работе дизельных установок не зависит от их количества и определяется только уровнем КПД дизельных установок, а также температурой и влажностью входящей вентиляционной струи. Это следует из того факта, что параметры «n» и «β» не зависят от параметра «q_0», т.е. от количества дизельных машин, работающих в сооружении. Переменными являются произведения (nq_0) и (βq_0), но, так как они связаны между собой отношением в формуле (8), то и приращение энтальпии не зависит от «q_0». Более того, это приращение не зависит и от объема сооружения, в котором работают дизельные установки, и полностью определяется нормативным значением расхода воздуха по разжижению вредных газов до норматива ПДК КПД дизельных установок и плотностью подаваемого в сооружение воздуха.

На основании выполненного анализа можно сделать следующий вывод: уровень приращения энтальпии воздуха в подземных сооружениях криолитозоны при работе дизельной техники зависит от плотности воздуха входя-

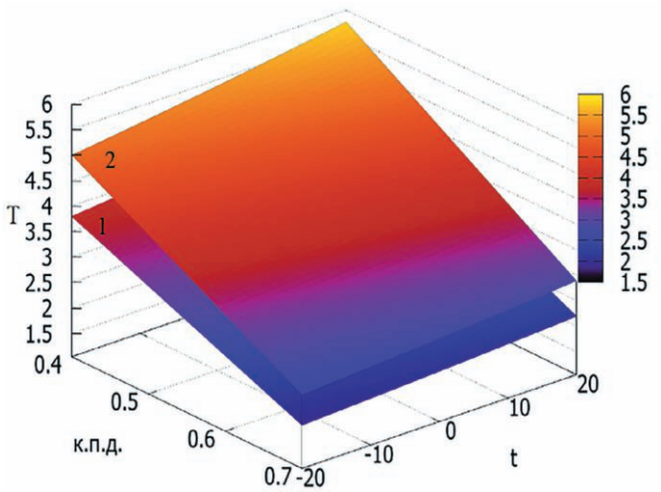


Рис. 1
Приращение температуры воздуха в подземном сооружении в зависимости от начальной температуры и КПД двигателя (0,4–0,7) дизельных машин и механизмов:
1 – при нормативном расходе воздуха 5,0 м³ в минуту на 1 л.с. мощности;
2 – при нормативном расходе воздуха 3,5 м³ в минуту на 1 л.с. мощности

Fig. 1
The air temperature increment in an underground facility depending on the initial temperature and the engine efficiency (0.4–0.7) of the diesel engines and mechanisms:
1 – at a standard air flow rate of 5.0 m³ per minute per 1 horse power;
2 – at a standard air flow rate of 3.5 m³ per minute per 1 horse power

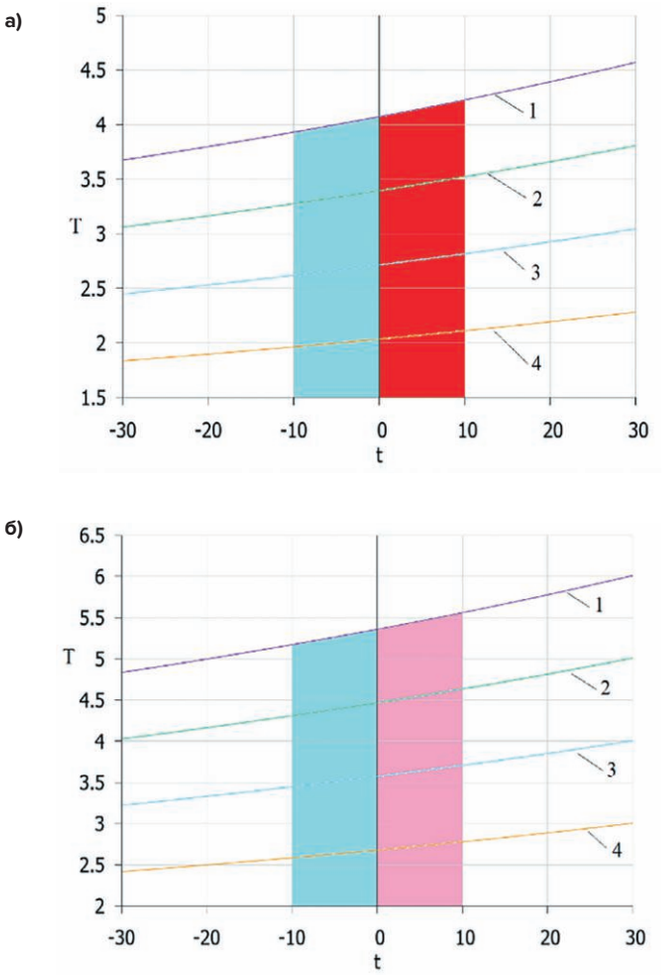


Рис. 2
Приращение температуры воздуха в подземном сооружении в зависимости от начальной температуры:
а – при нормативном расходе воздуха 5,0 м³ в минуту на 1 л.с. мощности;
б – при нормативном расходе воздуха 3,8 м³ в минуту на 1 л.с. мощности; 1 – η = 0,4;
2 – η = 0,5; 3 – η = 0,6;
4 – η = 0,7

Fig. 2
The air temperature increment in an underground facility depending on the initial temperature:
a – at a standard air flow rate of 5.0 m³ per minute per 1 horse power;
б – at a standard air flow rate of 3.8 m³ per minute per 1 horse power;
1 – η = 0.4; 2 – η = 0.5;
3 – η = 0.6; 4 – η = 0.7

щей вентиляционной струи и КПД дизельных установок и не зависит от количества и мощности дизельной техники. То есть главная неточность авторов работ [4; 5] в том, что, увеличивая количество дизельной техники (суммарной мощности установок), они не увеличили количество воздуха в соответствии с существующими нормативами. Это привело к ошибочным количественным выводам о роли машин с дизельным приводом в формировании теплового режима подземных сооружений. На самом деле вклад этого вида абсолютных источников несколько ниже, хотя и играет важную роль в формировании теплового режима горных выработок подземных сооружений криолитозоны. На рис. 1 приведен 3D график, характеризующий уровень приращения температуры воздуха в подземном сооружении за счет работы дизельных установок при нормативах 5,0 и 3,5 м³/мин на 1 л.с. при изменении КПД двигателя в диапазоне от 0,4 до 0,7.

Как видно из графиков на рисунке, наибольшее влияние на изменение температуры оказывает значение КПД двигателя: чем совершеннее дизельная установка, тем меньше приращение температуры. При этом наблюдается следующая закономерность: чем выше начальная температура воздуха в сооружении, тем выше прирост температуры, независимо от КПД двигателей дизельных установок. Даже для несовершенных дизельных установок (КПД равен 0,4) приращение температуры за счет работы дизельных установок не превышает 6,0 °С при положительной температуре воздуха и 5,0 °С при отрицательной температуре воздуха. При изменении нормативного расхода воздуха наблюдается очевидное соотношение: чем меньше нормативный расход воздуха, тем больше прирост температуры. Зависимость прироста температуры в сооружении от начальной температуры вентиляционного воздуха незначительна и не превышает 1,0 °С даже при минимальном КПД установок. С повышением КПД двигателя эта зависимость становится еще менее выраженной – нижняя линия плоскостей на рисунке почти параллельна оси температур. Анализ графиков показывает, что для наиболее вероятного сочетания исходных данных приращение температуры от работы дизельных установок не может превысить 3,5 °С при нормативном расходе 5,0 м³ на 1 л.с. мощности и 5,0 °С при нормативном расходе 3,5 м³ на 1 л.с. мощности установок.

Представление вариантных расчетов в виде трехмерных графиков дает скорее качественную характеристику рассматриваемого процесса. Для установления конкретных, характерных количественных закономерностей данные расчетов целесообразно представить в виде 2D графиков.

На рис. 2 представлены графики изменения приращения температуры воздуха в сооружении при двух значениях нормативного расхода для диапазона изменения начальной температуры воздуха от –30 до +30 °С.

Цветом на рисунках выделены наиболее характерные области изменения температур в горных выработках подземных сооружений криолитозоны. Как следует из графиков, при верхнем значении нормативного расхода воздуха максимальная разность значений приращения температуры в диапазоне –30 – +30 °С составляет приблизительно 0,8 °С при самом низком значении КПД двигателя (60% энергии идет на теплообразование) и приблизительно 0,4 °С при максимальном КПД двигателя (30% энергии идет на теплообразование). При этом максимальное значение приращения температуры равно 4,6 и 2,3 °С соответствует максимальному значению рассмотренного температурного диапазона температуры вентиляционной струи (+30 °С). Для нижнего нормативного значения расхода воздуха (рис. 2, *б*) аналогичные значения составляют 6,0 и 3,0 °С. Приращение разности температур составляет 1,2 и 0,6 °С. Максимально возможное значение приращения температуры в характерной области изменения положительных температур в горных выработках подземных сооружений криолитозоны (выделена красным и розовым цветом) не превышает 5,6 °С, а в области изменения отрицательных температур (выделена голубым цветом) 5,4°С. Если брать средние значения, то наиболее вероятный диапазон приращения температур при работе дизельной техники в зимний период составляет 2,5–3,0 °С, а в летний период 3,5–4,0 °С.

Заключение

Проанализированы существующие методы оценки приращения температуры от действия абсолютных источников. Доказана ошибочность отдельных выводов, в частности, о существенном влиянии количества работающих установок и их мощности на тепловой режим горных выработок криолитозоны. Установлено, что рассматривать дизельные установки как абсолютные источники тепла можно лишь в совокупности с пропорциональным изменением расхода воздуха в зависимости от мощности источника, как предусмотрено правилами безопасности ведения горных работ.

На основании качественного и количественного анализа полученных зависимостей показано, что приращение температуры воздуха в подземных сооружениях криолитозоны при работе машин и механизмов с дизельным приводом не зависит от их количества и мощности, и определяется только КПД двигателей и начальной температурой воздуха в сооружении. В частности, установлено, что во всем практически возможном диапазоне изменения начальной температуры воздуха в подземных сооружениях криолитозоны приращение температуры от работы дизельных установок не может превысить 6,0 °С. Для наиболее вероятных сценариев эксплуатации подземных сооружений эта величина составляет 3,5 °С при нормативном расходе воздуха 5 м^3 в минуту на 1 л.с. мощности и 5,0 °С при нормативном расходе воздуха 3,5 м^3 в минуту на 1 л.с. мощности установок. Для характерных температурных условий эксплуатации подземных сооружений криолитозоны при оценочных расчетах можно считать, что наиболее вероятный диапазон приращения температур при работе дизельной техники в зимний период составляет 2,5–3,0 °С, а в летний период 3,5–4,0 °С.

Дальнейшие исследования в этой области целесообразно направить на сравнение методов расчета тепловыделений дизельных установок через термодинамический КПД двигателя и через теплоту сгорания топлива, что позволит максимально учесть изменение тепловыделений в различные технологические периоды работы горной техники.

Список литературы / References

1. Галкин А.Ф., Панков В.Ю. Влияние способа учета абсолютных источников тепла на точность прогноза температуры в подземных сооружениях криолитозоны. *Горные науки и технологии*. 2023;8(3):207–214. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105
Galkin A.F., Pankov V.Yu. Absolute heat sources as a method to check the accuracy of temperature prediction in underground structures within cryolithozone. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):207–214. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105
2. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Фёдоров Я.В. Изменение температуры в камерах подземных сооружений при работе дизельных установок. *Вопросы безопасности*. 2022;(4):27–33. https://doi.org/10.25136/2409-7543.2022.4.38938
Galkin A.F., Pankov V.Y., Fedorov Y.V. Temperature change in the chambers of underground structures when operating diesel units. *Security Issues*. 2022;(4):27–33. (In Russ.) https://doi.org/10.25136/2409-7543.2022.4.38938
3. Смирнов Ю.М., Гендлер С.Г., Костылев П.П., Кулинич С.С. *Исследование тепловыделений при работе дизельного оборудования*. В кн.: Физические процессы горного производства. Л.: ЛГИ; 1976. Вып. 3. С. 77–80.
4. Казаков Б.П., Зайцев А.В. Исследование процессов формирования теплового режима глубоких рудников. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. *Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2014;(10):91–97.
Kazakov B.P., Zaitsev A.V. Study of the formation of thermal regimes in deep mines. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2014;(10):91–97. (In Russ.)

5. Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Соловьев Д.Е. Особенности формирования теплового режима россыпных шахт криолитозоны при ведении добычных работ с применением самоходной техники. *Горный журнал*. 2015;(4):29–32. https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.06
Kurilko A.S., Khokholov Yu.A., Soloviev D.E. Features of formation of temperature conditions in placer mines equipped with self-propelled machines in permafrost zone. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(4):29–32. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.06

6. Galkin A., Pankov V. Formation of thermal regime in a permafrost area mine. In: Beskopylny A., Shamtsyan M. (eds) *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021", Rostov-on-Don, February 24–26, 2021*. Cham; Springer, 2021, pp 205–213. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_21

7. Галкин А.Ф., Дормидонтов А.В., Курта И.В., Короткова К.Б. Влияние дизельных машин на температурный режим горных выработок. *Естественные и технические науки*. 2018;(5):84–86.
Galkin A. F., Dormidontov A. V., Kurta I. V., Korotkova K. B. Influence of diesel vehicles on the temperature regime of mine workings. *Natural and Technical Sciences*. 2018;(5):84–86. (In Russ.)

8. Вернигор В.М., Морозов К.В., Бобровников В.Н. О подходах к проектированию теплового режима рудников в условиях многолетнемерзлых пород. *Записки Горного института*. 2013;205:139–140. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5508 (дата обращения: 05.04.2026).
Vernigor V.M., Morozov K.V., Bobrovnikov V.N. On approaches to designing of thermal regime at ore mines under permafrost conditions. *Journal of Mining Institute*. 2013;205:139–140. (In Russ.) Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5508 (accessed: 05.04.2026).

9. Галкин А.Ф. Тепловой режим рудников криолитозоны. *Записки Горного института*. 2016;219:377–381. https://doi.org/10.18454/PMI.2016.3.377
Galkin A.F. The thermal condition of the mines in cryolite zone. *Journal of Mining Institute*. 2016;219:377–381. (In Russ.) https://doi.org/10.18454/PMI.2016.3.377

10. Янченко Г.А., Кириченко И.В. Инженерные методы: расчёта плотности влажного воздуха. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(11):112–115. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2008/11/4_YAnchenko3.pdf (дата обращения: 05.04.2026).
Yanchenko G.A., Kirichenko I.V. Engineering methods: calculation of humid air density. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(11):112–115. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2008/11/4_YAnchenko3.pdf (accessed: 05.04.2026).

11. Czarick M., Fairchild B. Cold, humid air is lighter than cold, dry air. *Poultry Housing Tips*. 2009;21(12). Available at: http://www.poultryventilation.com/wp-content/uploads/vol21n12.pdf (accessed: 05.06.2026).

12. Миняев В.В. Расчет параметров атмосферы с учетом влажности воздуха. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2004;(2):106–120. Режим доступа: https://vestniken.bmstu.ru/articles/425/425.pdf (дата обращения: 05.04.2026).
Minyaev V.V. Computation of atmosphere parameters considering air humidity. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2004;(2):106–120. (In Russ.) Available at: https://vestniken.bmstu.ru/articles/425/425.pdf (accessed: 05.04.2026).

Информация об авторе
Панков Владимир Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов автодорожного факультета, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-4933-0265; e-mail: pankov1956@inbox.ru

Information about the author
Vladimir Yu. Pankov – Cand. Sci. (geol.-mineral.), Associate Professor, Department of Highways and Airfields, Faculty of Road Construction, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4933-0265; e-mail: pankov1956@inbox.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 02.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 05.07.2026

Article info
Received: 02.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 05.07.2026