

оценить состав руд и скорость окислительных процессов в массиве, гидрогеологические и газовой-геохимические исследования – определить природу и поведение рассолов и газов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 121111800053-1).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. Аэрология горных предприятий: [учебник]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 421 с.
2. Семин М.А., Исаевич А.Г., Трушкова Н.А., Бублик С.А., Казаков Б.П. К вопросу о расчете распространения вредных примесей в системах горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 2. – С. 82-93. – DOI: 10.15372/FTPRPI20220208.
3. 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).
4. Кайтмазов Н.Г. Производство металлов за полярным кругом: технологич. пособие. – Норильск, 2007. – 597 с.
5. Нестеров Е.А. Газопроявления при проходке разведочных выработок на руднике Скалистый ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 123-129. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.20.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2022.3.16

## РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И ТОЧЕЧНЫХ ПОЖАРАХ В РУДНИЧНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ

М.Д. Попов, А.В. Таций  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** В статье описан предложенный авторами подход к определению мощности тепловыделения от распределенных и точечных пожаров с целью определения исходных данных для инженерных расчетов на ЭВМ необходимых в силу пункта 26 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы». В работе представлены две методики расчета тепловыделения: при точечных и распределенных пожарах, а также результаты расчета для различной применяемой в подземных рудниках техники.

**Ключевые слова:** рудник, подземный пожар, аварийная ситуация, тепловыделение, безопасность.

### Введение

Современные правила в области промышленной безопасности [4] в соответствии с пунктом 26 устанавливают требования для проведения инженерных расчетов, к которым относятся: расчеты параметров развития пожара, режимов проветривания и противопожарного водоснабжения, устойчивости проветривания при пожаре в вертикальных или наклонных горных выработках, зон поражения при пожарах и взрывах проводятся с использованием программного обеспечения на

электронно-вычислительных машинах на основе моделей топологии горных выработок, подземной части рудников.

При этом отсутствует методология определения мощностей источников тепловыделения, которые в свою очередь являются необходимыми исходными данными для проведения расчетов устойчивости и параметров вентиляции в аварийном режиме проветривания рудника [2, 3]. Таким образом, для проведения расчетов аварийных режимов необходима разработка унифицированного подхода к определению исходных данных, основанного на физических свойствах горючего материала.

### **Исследование точечных и распределенных источников тепловыделения**

По характеру распространения горючей нагрузки экзогенные подземные пожары и, соответственно, источники тепловыделения подразделяются на точечные и распределенные [1]. К точечным источникам теплоты в результате шахтных пожаров можно отнести возгорание самоходной техники. К распределенным источникам в свою очередь относятся пожары деревянной крепи и конвейерной техники.

В случае точечных пожаров вся пожарная нагрузка занимает достаточно короткий участок горной выработки по отношению к ее длине. При определении мощности точечных источников тепловыделения принимается допущение, что выгорание горючей нагрузки происходит равномерно и вся горючая нагрузка в начальный момент времени охвачена пламенем, так как вся пожарная нагрузка занимает достаточно короткий участок горной выработки по отношению к ее длине. При этом основным параметром, определяющим количество выделяющегося тепла, является скорость выгорания, которая при горении в условиях достаточности или избытка кислорода [9] является величиной, постоянной по времени.

Для дальнейших рассуждений воспользуемся «традиционным» методом представления кривой тепловыделения, описанным в [8], поскольку значения тепловыделения должны быть приближены к максимальным. При использовании данного метода количество тепла, передаваемого потоку воздуха, представляется в виде пожара с постоянным по времени значением тепловыделения.

Количество теплоты, выделяемое в процессе горения в определенный момент времени, можно записать в следующем виде:

$$Q = \psi \cdot Q_n \cdot \eta \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент полноты горения;  $Q_n$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $\psi$  – массовая скорость выгорания материала с пожарной нагрузки в данный момент времени, кг/с ( $\psi = \psi_{уд} \cdot S$ , где  $S$  – площадь горения в данный момент времени).

Для определения времени, необходимого для выгорания горючей нагрузки, запишем выражение (1) в следующем виде:

$$t_{cp,i} = \frac{m_i \cdot \eta}{\psi_{уд,i} S_i}, c \quad (2)$$

где  $m_i$  – масса горючего компонента, кг.

Для выражения (2) в качестве площади горения принимается площадь поверхности сферы, в которую вписана вся масса горючей нагрузки для каждого компонента. В результате подстановки значений получаем время горения по каждому

из компонентов горючей нагрузки. К примеру, если рассмотреть горение машины с дизельным приводом, то основными компонентами горючей нагрузки являются: дизельное топливо, резина в составе колес и гидравлических шлангов, масло в двигателе и гидравлической системе. Основные табличные свойства компонентов, входящих в состав горючей нагрузки самоходной техники, приведены в таблице 1.

Таблица 1

## Характеристика горючей нагрузки

Компонент	Удельная массовая скорость выгорания	Низшая теплота сгорания	Линейная скорость распространения пламени
Колесная резина	0,018 кг/(м <sup>2</sup> ·с)	33,5 МДж/кг	2,99 мм/с
Резиновые шланги			
Дизельное топливо	0,040 кг/(м <sup>2</sup> ·с)	42,6 МДж/кг	3,16 мм/с
Масло в двигателе	0,043 кг/(м <sup>2</sup> ·с)	42,7 МДж/кг	1,59 мм/с
Масло в гидравлической системе			

Из вычисленного массива данных по формуле (2) выбирается максимальное значение времени, для которого производится пересчет количества тепла, выделяющегося в единицу времени по каждому из компонентов по следующей формуле:

$$W_{cp,i} = \frac{m_i \cdot \eta \cdot Q_{H,i}}{t_{cp}}, \text{ Вт} \quad (3)$$

Дальше суммированием всех средних значений тепловыделения по каждому из компонентов получаем искомое значения тепловыделения для пожара.

$$W_{cp} = \sum_i W_{cp,i}, \text{ Вт} \quad (4)$$

График полученного эквивалентного значения тепловыделения, принимаемого для расчета тепловой депрессии при возгорании самоходной техники, представлен на рисунке 1.

К процессу горения при распределенных пожарных нагрузках в подземных условиях относится горение конвейерной ленты или деревянной крепи. Методика определения тепловыделения точечного источника из-за принятых допущений к данной ситуации не применима. Это обусловлено тем, что процесс воспламенения всей горючей нагрузки конвейерной ленты или крепи из-за большой протяженности занимает длительный промежуток времени. Весь объем горючего материала выгорает постепенно по мере продвижения фронта огня. Таким образом, необходимо определить время, за которое вся распределенная горючая нагрузка будет охвачена пламенем.

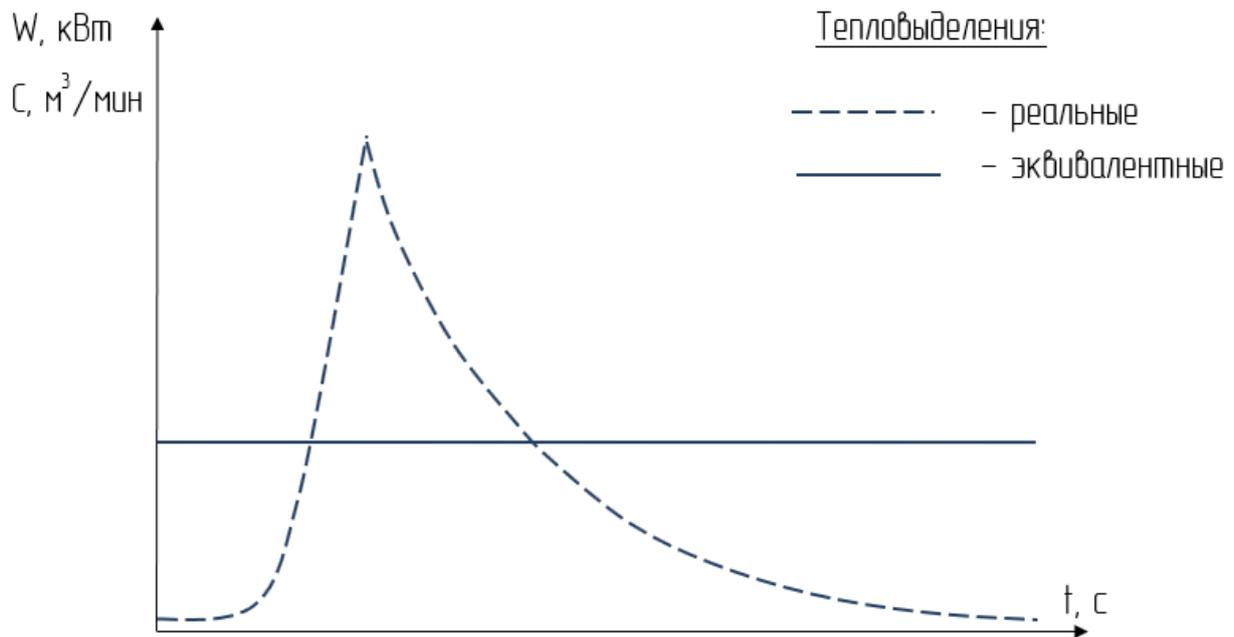


Рис. 1. Принципиальный вид эквивалентного тепловыделения при горении техники

Для определения эквивалентного значения тепловыделения предлагается воспользоваться следующей методикой. На начальном этапе определяется суммарное количество теплоты, которое выделится при полном выгорании всей длины конвейерной ленты, по формуле:

$$Q = 2 \cdot L \cdot D \cdot h \cdot \rho \cdot Q_n \cdot \eta, \text{ кДж} \quad (5)$$

где  $L$  – длина конвейерной ленты, м;  $h$  – толщина конвейерной ленты, м;  $D$  – ширина конвейерной ленты, м;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент полноты горения;  $Q_n$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

При этом, в отличие от точечного источника, при рассмотрении распределенного пожара основным фактором, определяющим количество выделяемого тепла в единицу времени, является скорость распространения пламени.

Данный параметр, в свою очередь, определяется скоростью воздушного потока подходящего к очагу пожара. Увеличение скорости воздушного потока увеличивает интенсивность, скорость тепловыделения от пожара, особенно во время фазы его развития. Исследования влияния скорости воздушного потока на пиковое значение тепловыделения показали, что максимальное значение тепловыделения достигается при скоростях от 4 до 5 м/с [8]. При этом дальнейшее увеличение скорости снижает максимальное тепловыделение, это обусловлено увеличением продолжительности фазы распространения пожара из-за противодействия воздушного потока фронту распространения огня.

Для определения скорости распространения пламени по площади горючей нагрузки предлагается воспользоваться формулой [6]:

$$V_{л} = \frac{v}{0.0111 + 0.009 \cdot v}, \text{ м/ч} \quad (6)$$

При известной скорости распространения пламени и длины участка тепловыделения среднее значение тепловыделения находится по формуле:

$$W_{\text{ср}} = \frac{Q \cdot V_{\text{л}}}{L}, \text{ м/ч} \quad (7)$$

Далее представлены результаты расчета для определения эквивалентного значения тепловыделения при точечном и распределенном источнике тепловыделения. В качестве примера для расчета при точечном источнике тепловыделения используются технические характеристики различной техники, используемой на подземных рудниках.

Таблица 2

Технические характеристики типовых элементов техники

Элемент	Параметры		
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$V_{\Sigma}$ кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$Q_{\text{н}}$ , МДж/кг
Резина	1200	0,02	33,5
Дизельное топливо	830	0,043	42,6
Технические жидкости	900	0,043	41,8

Таблица 3

Результаты расчета тепловыделения от точечных источников

Параметр		Тип техники		
		ПДМ CAT R1700G	Буровая установка Boomer 282	Самосвал CAT AD22
M, кг	Резина	2000	2700	2200
	Дизельное топливо	570	60	360
	Технические жидкости	125	140	100
$W_{\text{ср}}$ , МВт		8,92	7,5	8,2
t, мин		180	220	192

Результаты расчета при тепловыделении от точечных источников указывают, что среднее значение тепловыделения непосредственно зависит от массы сгораемых элементов техники. Наибольшее влияние на количество тепловыделения оказывает масса состоящих из резины элементов, таких как покрышки, провода, шланги и т.д.

Для расчета при распределенных источниках тепловыделения в качестве примера используются технические характеристики различных по ширине конвейерных лент. В таблице 4 содержатся результаты, полученные при расчете по представленной методике.

Таблица 4

Результаты расчета эквивалентного значения тепловыделения  
и среднего значения тепловыделения от распределенного источника

Параметр	Значение		
	1	2	3
L, м	1000	1000	1000
D, м	1	1,2	1,6
h, м	0,024	0,024	0,024
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1370	1370	1370
$\eta$	1	1	1
$Q_n$ , кДж/кг	35,5	35,5	35,5
Q, кДж	1167240	1400688	1867584
$W_{cp}$ , МВт	27,54	33,04	44,06

Полученные результаты расчета тепловыделения от распределенного источника пожара, в качестве которого выбрана конвейерная лента, показывают увеличение эквивалентного значения тепловыделения и среднего значения тепловыделения от увеличения ширины ленты и, соответственно, массы сгораемого материала.

### Выводы

В результате проведенной работы представлены расчеты тепловыделения от точечных и распределенных пожаров. Приведены таблицы с результатами расчета тепловыделения от точечных источников тепловыделения и от распределенных соответственно. Представленный подход на основе физических свойств горючего материала различных технических устройств, применяемых в подземных рудниках, позволяет произвести расчеты эквивалентного значения тепловыделения и среднего значения тепловыделения с целью получения исходных данных для выполнения инженерных расчетов на ЭВМ в соответствии с пунктом 26 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы».

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта № 20-35-90072.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гришин Е.Л. Научное обоснование способов повышения надежности вентиляционных сетей подземных рудников: дис. ... к.т.н.; 25.00.20 / Гришин Евгений Леонидович. – Пермь, 2013. – 133 с.
2. Левин Л.Ю., Палеев Д.Ю., Семин М.А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 81-85.

3. Попов М.Д., Кормщииков Д.С. Расчет опрокидывания воздушной струи в вертикальных и наклонных горных выработок при пожаре по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэро-сеть» // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 84-89. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.18.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы»: утв. 11.12.2020, № 520. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140267>. Дата обращения (15.09.2022).
5. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. – М.: Акад. ГПС МЧС России, 2005 г. – 336 с.: ил., табл.
6. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1966. – 249 с.
7. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания вентиляционных сетей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 10 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2012. – С. 255-257.
8. Handbook of tunnel fire safety / ed.: Beard A., Carvel R. – ICE publishing, 2012. – 677 p.
9. Brake, D.J. Fire Modelling in Underground Mines using Ventsim Visual VentFIRE Software // The Australian Mine Ventilation conference: Proceedings. – Adelaide, 2013. – P. 265-276.

УДК: 622.4

DOI:10.7242/echo.2022.3.17

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОТБОРА РУДНИЧНОГО ГАЗА НА РУДНИКАХ ВЕРХНЕКАМЬЯ

А.Н. Стариков, И.И. Козунин  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Работа посвящена анализу применяемых в настоящее время способов отбора проб рудничного воздуха для определения относительной газообильности горючих газов в условиях калийных рудников Верхнекамского месторождения калийных солей. Для сравнения выбраны следующие способы отбора проб рудничного воздуха: мокрый способ в стеклянных сосудах и мокрый способ в виде «капельного» пробоотборника. В работе испытан и предложен «поршневой» способ отбора проб рудничного воздуха в пластиковый шприц, который содержит горючий газ, для дальнейшей транспортировки и анализа их концентраций в лабораторных условиях.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, относительная газообильность, отбор проб, газовая съемка, рабочая зона, рудничный воздух, мокрый способ, поршневой способ.

Разработка Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей (далее ВМКМС) сопровождается выделением природных газов из массива и из отбитого полезного ископаемого. Газы содержатся в продуктивных пластах, в глине и междупластьях [2]. В условиях ВМКМС из числа горючих и взрывоопасных газов присутствует метан и водород, а из токсичных – сероводород и некоторые другие газы [3].

Согласно п. 164 ФНиП №505 «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [1] для обеспечения безопасности ведения горных работ на шахтах в условиях «газового режима» научными институтами должны разрабатываться и утверждаться руководителем организации специальные мероприятия по ведению горных работ в данных условиях. Требования «Специальных мероприятий по безопасному ведению горных работ» [2] указывают на необходимость проведения ежегодных газовых съемок.