

4. Цапенко Е.Ф., Шкундин С.З. *Электробезопасность на горных предприятиях: Учеб. пособие.* – 3 изд., стер. – М.: Изд-во МГГУ, 2008. – 103 с.: ил.
5. Zhang X., Guan Y., Fang Z., Liao Y. *Fire Risk Analysis and Prevention of Urban Comprehensive Pipeline Corridor // Procedia Engineering.* – 2016. – Vol. 135. – P. 463–468. – DOI:10.1016/j.proeng.2016.01.156.
6. Li-dong Wang, Hai-tao Sun, Hong Zhou, *Fire risk analysis and fire safety design of comprehensive pipeline corridor in a community // Water and wastewater engineering.* – 2015. – V. 41. – P. 66–68.
7. Vicente D.J., Garrote L., Sanchez R. and Santillan D. *Pressure management in water distribution systems: Current status, proposals, and future trends // Journal of Water Resources Planning and Management.* – 2016. – V. 142, № 2. – Номер статьи 04015061. – DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000589.
8. Peng Y., Jiang Z. *Optimization of underground mine water supply network // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2019. – V. 300, № 2. – Номер статьи 022115. – DOI: 10.1088/1755-1315/300/2/022115.
9. *Аэросеть* – Решение проблем рудничной вентиляции: [официальный сайт]. – Текст электронный. – URL: <http://aeroset.net>. – (дата обращения: 17.05.2021).
10. *Вентиляция 2: Программный комплекс:* [официальный сайт]. – Текст электронный. – URL: <https://minesoft.ru>.
11. *VentSim:* [официальный сайт]. – Текст электронный. – URL: <https://ventsim.com/ru/>.
12. Сафина Л.Г., Махлаев В.К. *Сравнение различных формул для расчёта потерь напора по длине в трубах // Избранные доклады 62-й университетской науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых.* – Томск, 2016. – С. 1347–1350.
13. Vaabel J., Koppel T., Sarv L., Annus I. *Determination of Water Distribution Network Resistance Coefficient and Hydraulic Capacity // Procedia Engineering.* – 2014. – V. 89. – P. 679–684. – DOI:10.1016/j.proeng.2014.11.494.
14. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. *Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справ. пособие.* – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Стройиздат, 1984. – 117 с.
15. СП 31.13330.2012 *Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.* Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84\* с изменением № 1: утв. Минрегион России 29.12.2011. – М., 2015. – 132 с.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2021.2.20

## НОВЫЕ ПАРАДИГМАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ДИНАМИКОЙ ПЫЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДОБЫЧЕ КАЛИЙНОЙ РУДЫ

Г.З. Файнбург, А.Г. Исаевич  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье рассматриваются новые парадигмальные подходы к управлению динамикой пылевой обстановки при механизированной добыче калийной руды, когда традиционные методы снижения концентрации пыли становятся неэффективными. Рассмотрены основные массообменные процессы, возникающие при проветривании горных выработок, и показаны некоторые особенности переноса пыли калийной соли при действии данных процессов. Обсуждены достоинства и недостатки нагнетательного и всасывающего способов проветривания применительно к калийным рудникам. Описаны результаты экспериментальных исследований всасывающего способа проветривания на руднике СКРУ-3.

**Ключевые слова:** калийная соль, аэрозоль, пыль, микрозонирование, зона дыхания, процесс вытеснения, процесс смешения.

### Введение

Любая добыча полезных ископаемых, включая калийную руду, сопровождается разрушением сплошного массива и образованием целого спектра его фрагментов – от негабарита при буровзрывной выемке через «щебенкообразную» руду комбайновых комплексов к пылевидным фракциям (не обогащаемым флотацией), которые содержат пылевидные частицы и более тонкодисперсный респираторный аэрозоль [1].

В настоящей статье речь пойдет об особенностях формирования и динамики пылевидных частиц калийной соли в подземных горных выработках. На калийных рудниках образование пыли неизбежно происходит на всех этапах разрушения горного массива, погрузки отбитого продукта и дальнейшей перегрузки руды на путях ее транспортировки.

Вопросам патофизиологического влияния калийной пыли на здоровье работников шахт посвящены многочисленные работы [2, 3]. Пневмокониозы – группа болезней, вызванных пылью, – являются одним из лидеров по профзаболеваемости. Они связаны с вдыханием пыли, поскольку она содержится в зоне дыхания горнорабочих. Устранение пыли из зоны дыхания горнорабочих достигается как мероприятиями по уменьшению ее генерации источниками пыления (комбайн, бункер-перегрузатель, пересып конвейера и пр.), так и мероприятиями по наискорейшему улавливанию или осаждению пыли в сети горных выработок, расположенных за источником пыления по потоку воздуха. Еще одним классом мероприятий является применение средств индивидуальной защиты органов дыхания. Первые два класса так или иначе связаны с организацией проветривания горных выработок.

### **Основные процессы проветривания**

Физические законы природы подчиняются закону сохранения энергии, массы, импульса, момента импульса и т.п. В данном случае можно выделить две основные «структуры» течения сплошной среды, порожденные этими законами. Во-первых, это прямолинейное поступательное движение, а во-вторых, вращательное, вихревое движение. Все остальные течения, в том числе подверженные пространственной и временной неоднородностям, являются той или иной комбинацией этих основных движений [4, 5, 6].

Роль этих движений в проветривании горных выработок различна. Основным течением рудничной вентиляции является поступательное движение вентиляционной струи. Оно вытесняет любые объемы воздуха, замещая их другими. Здесь главным является факт вытеснения загрязненных объемов воздуха более чистыми. Эффективность такого проветривания равна 100%, однако наличие вязкости воздуха и действие закона сохранения масс (в форме уравнения неразрывности) приводит к возникновению различного рода и масштабов вихревого движения. Оно искажает процессы вытеснения в среднем по горной выработке или ее части. Поэтому о процессах переноса в виде вытеснения в рудничной аэрологии говорят, как об «идеальном вытеснении».

Вихревые движения переносят и перемешивают объемы с различным уровнем загрязнения. Эквивалентно и эффективно они осуществляют процессы смешивания воздушных потоков, способствуют разбавлению очень загрязненных объемов воздуха, но одновременно и загрязняют все новые и новые объемы свежего воздуха. В пределе, когда весь объем выработки практически мгновенно загрязняется, говорят о процессах «идеального смешивания». Сочетание процессов вытеснения и смешивания и определяют реальные конкретные варианты проветривания той или иной горной выработки. Так, в штрекообразных выработках превалирует процесс вытеснения, а в камерообразных выработках – процесс смешивания.

### **Математические модели переноса пыли**

Рассмотрим сначала сквозную выработку, в которой происходит бурение шпуров, позволяющее затем отбить полезное ископаемое по всему сечению очистной выработки, которое много больше сечения сквозной разрезной выработки.

Описание процессов переноса, необходимое для подсчета количества потребного для проветривания количества воздуха в той или иной зоне сквозной выработки, можно

вести различным способом. Самый простой способ – описание одной зоны (одного рабочего места) с выделением объема рабочего места  $V$ , равного площади сечения разрезной выработки  $S$  на длину рабочего места (называемого и зоной)  $L$ , включающего буровую установку.

Пусть по выработке идет  $Q$  куб.м/с свежего воздуха с концентрацией пыли  $C^+$ . Тогда уравнение баланса массы пыли в рабочей зоне (на рабочем месте) может быть записано так:

$$QC^+ + q = QC^-, \quad (1)$$

где  $q$  – поток пыли, поступающий в выработку от бурения,  $C^-$  – концентрация пыли в исходящей струе. Заметим, что в этом уравнении отсутствуют геометрические параметры выработки ( $S$ ,  $L$  и  $V$ ). И в этом сразу виден очень высокий уровень ее абстракции и идеализации. В реальности (1) не совсем справедливо. Если  $\sqrt{S}$  примерно равно  $L$ , то смешивание можно считать полным и в качестве концентрации пыли  $C$  в рабочей зоне принять  $C^-$ . Тогда  $C = C^+ + q/Q$ , а  $Q = q/(C - C^+)$ . Последнее выражение тривиально – чем больше пыли и чем грязнее входящий воздух, тем больше «свежего» воздуха надо подать для проветривания горной выработки.

Рассмотрим теперь эту же задачу более детально. Опишем рабочую зону с буровой установкой по-прежнему уравнением (1). Пусть бурильщик стоит перед источником пыли (по потоку воздуха), т.е. на свежем воздухе. Уравнение баланса массы пыли в локальной зоне его нахождения опишем аналогично (1) моделью смешения в виде ( $q = 0$ ):

$$QC^+ = QC^-, \quad (2)$$

Отсюда легко видеть, что при любых расходах воздуха  $Q$ , не равных нулю, концентрация примеси в этой локальной зоне равна концентрации пыли в свежем воздухе. Сам расход  $Q$  может быть любым, но не менее  $U_{min}S$ , где  $U_{min}$  – минимальная скорость движения воздушной струи по Правилам безопасности.

Из этого примера следует вывод о том, что правильное использование понятий зоны вверх по потоку со «свежим» воздухом и зоны вниз по потоку с «загрязненным» воздухом позволяет эффективно проветривать рабочее место. Теперь можно попробовать применить эти идеи для проветривания тупикового забоя при комбайновой выемке калийных руд.

### **Пылевая обстановка в тупиковом забое**

Пусть добыча калийной руды осуществляется проходческо-очистным комбайновым комплексом, в состав которого входят добычной комбайн, бункер-перегрузочный и шахтный самоходный вагон. Исполнительный орган проходческо-очистного комбайна посредством режущего инструмента внедряется в калийный массив и разрушает его. Продукты резания подбирает с почвы выработки погрузочное оборудование и транспортирует горную массу с почвы выработки к скребковому конвейеру. Основная масса пыли образуется при разрушении массива. Далее руда, в том числе переизмельченная, грузится насыпью в бункер-перегрузочный, что вызывает образование большого количества пыли. Затем руда после бункера перегружателя попадает в самоходный вагон, также насыпью. Стрела конвейера комбайна расположена высоко, а дно бункера-перегрузочного – достаточно низко. Падение руды в пустой бункер перегружателя вызывает сильное пылеобразование. Перегруз в самоходный вагон почти не приводит к генерации дополнительного объема пыли ввиду технологических особенностей такой перегрузки.

Концентрация мелкодисперсных частиц в рабочей зоне добычного комбайна может достигать  $2000 \text{ мг/м}^3$ , при том, что ПДК составляет  $5 \text{ мг/м}^3$ . Анализ литературных источников [7, 8] показывает, что сильвинитовая пыль, образующаяся при работе проходческо-очистных комбайнов, имеет высокую степень дисперсности. Это неудивительно из-за наличия множества мелких кристаллов, а также легкого раскалывания по линиям спайности. Витая пыль размером менее  $5 \text{ мкм}$  легко проникает в дыхательные органы человека, а пылевидные частицы калийной руды размером менее  $250 \text{ мкм}$  не поддаются обогащению.

В данном случае классические методы пылеподавления, состоящие в жидкостном или паровом орошении места пылеобразования, продолжают работать для сильвинитовой пыли, но неприменимы на практике из-за водорастворимости соли и колоссальных объемов пылевыделения в высокопроизводительных комбайновых забоях калийных рудников [9]. Поэтому, по мнению авторов работы, решение нужно искать с применением средств вентиляции.

### **Исследование процесса управления динамикой переноса соляной пыли**

На протяжении сотен лет нагнетательный способ проветривания тупиковых забоев, преимущественно угольных шахт, технически доминировал над всасывающим, а последний представлялся теоретической возможностью, но не был востребован на практике. Кайло шахтера сменил буровзрывной метод отбойки, последний – энергоемкий самоходный комбайн, а нагнетательный способ по-прежнему признается Правилами безопасности для рудных шахт как единственно возможный.

По мнению авторов статьи, на практике основные достоинства нагнетательного способа для буровзрывной выемки превращаются при комбайновой выемке в прямопротивоположные недостатки.

Практический опыт пылевоздушных съемок на калийных рудниках Верхнекамского месторождения свидетельствует о том, что при нагнетательном способе проветривания расширяющаяся «деятельная» воздушная струя, выходящая из вентиляционного става, подхватывает выделяющуюся при загрузке бункера-перегрузателя пыль и направляет ее на рабочее место машиниста комбайна [1, 10]. Условия его труда оказываются сильно неблагоприятными не только по концентрации пыли, но и по температуре ( $+7 \dots +10^\circ\text{C}$ ) и скорости воздуха (более  $1 \text{ м/с}$ ). Для пласта АБ есть и дополнительный фактор – обильное выделение природных токсичных серосодержащих газов.

Если количество подаваемого воздуха соответствует Правилам безопасности, то «деятельная» струя воздуха распространяется до груди забоя и захватывает большое количество образующейся при рубке пыли, выбрасывает ее в пространство забоя. В данной ситуации условия труда машиниста комбайна оказываются сильно неблагоприятными.

Существуют три практических метода выхода из этой ситуации. Во-первых, применение различных способов, ограничивающих приток свежего воздуха. Во-вторых, применение различных способов, не ограничивающих приток свежего воздуха, но направляющих струю из вентиляционного става на кровлю выработки, поперек выработки, но не на рабочее место. В-третьих, применение противопылевых респираторов.

При нагнетательном способе проветривания тупикового забоя наихудшие условия для горнорабочих и наилучшие условия для калийной пыли характерны именно для забоя, который выступает «источником запыления» для всей тупиковой выработки, по длине которой наблюдается оседание крупнодисперсных частиц [11]. Оператор самоходного вагона работает в исходящей струе, содержащей максимальное количество пыли.

Анализ показывает, что интенсивность пылеобразования зависит от множества технических параметров добычного комбайна, таких как скорость подачи комбайна на забой, угол атаки резца, толщина стружки, геометрия оградительного щита, качество его герметизации и т.д. Несмотря на усилия научного сообщества, пока ничего сделать с огромным наличием пылевидных фракций не удастся, поскольку интенсивность пылеобразования зависит практически от производительности добычного комбайна. Даже при работе проходческо-очистного комбайна на холостом ходу концентрация пыли превышала ПДК.

В этих условиях применение идей микрозонирования и всасывающего способа проветривания может нормализовать пылевую обстановку. Обратим внимание, что с позиции рассмотрения всей призабойной зоны тупиковой горной выработки как объекта проветривания какой-либо разницы для газового баланса типа уравнения (1) в способе проветривания (нагнетательный или всасывающий) нет. Эта разница появляется при разбиении призабойной зоны на ряд микрозон, одна из которых, связанная с рабочим местом машиниста комбайна, становится «объектом проветривания». В этом случае способ проветривания становится существенным. Разберем это более детально.

### **Микрозонирование призабойной зоны**

Разобьем призабойную зону на ряд микрозон следующим образом. Во-первых, проведем горизонтальную поперечную нарезку пространства горной выработки – защитовое пространство, пространство между щитом и сечением всаса вентилятора пылесоса, сечение между комбайном и бункером-перегрузателем, сечение между бункером перегружателем и самоходным вагоном, сечение после самоходного вагона. Проведем еще два сечения вдоль выработки. Одно будет делить левую и правую сторону, другое – выделять зону высотой 30–50 см под кровлей.

Источниками пыли служат защитовая зона, левая и правая бункерные и вагонные зоны. Вращение режущего органа периодически выбрасывает под кровлю выработки запыленный воздух в виде «протуберанца» (типа солнечного) – всплеска запыленного воздуха.

### **Организация всасывающего проветривания**

В ходе проведения экспериментальных исследований всасывающего способа проветривания на руднике СКРУ-3 [12], наблюдая за структурой воздушных потоков, мы выяснили, что при всасывающем проветривании воздух движется в основном равномерно по всему сечению выработки к забою со скоростью не менее допустимой величины 0,15 м/с. В призабойной микрозоне между всасом вентилятора и щитом комбайна воздух движется в следующих направлениях: по почве и вдоль боковин выработки к щиту, у кровли и по поверхности комбайна – от щита к всасу вентилятора. В этой микрозоне наблюдается сильная турбулизация воздушных потоков и большая запыленность.

Изначально небольшая скорость воздуха свежей струи от устья выработки к забою увеличивается при обтекании бункера-перегрузателя и комбайна за счет уменьшения площади поперечного сечения выработки этим оборудованием и составляет на рабочем месте машиниста комбайна (в зоне дыхания) 0,8–1,2 м/с. Сравнительно устойчивые скорость и направление движения воздуха сохраняются до сечения, в плоскости которого находится всас вентилятора (2 м от щита комбайна). При нагнетательном проветривании аналогичная скорость движения воздуха на рабочем месте машиниста комбайна может быть получена лишь при отставании вентиляционного воздуховода от щита комбайна на 30–35 м.

Существует неправомерное мнение, о том, что в углах, в углублениях, в межкусковом пространстве отбитой руды воздушный поток не может эффективно «вымыть» пыль и газы (природные и отпалочные), что при всасывающем проветривании комбайнового комплекса существуют аналогичные «застойные» зоны. На практике такие зоны не наблюдались, т.к. структура потоков создавалась не только основным движением воздушных потоков к всасу вентилятора, но и вращающимися крыльчатками охлаждения двигателей комбайна.

Скорость воздуха как у почвы, так и в остальной части выработки по высоте в двухметровой зоне у щита комбайна слева и справа составила 0,5–1,5 м/с. Несмотря на наличие обратных потоков воздуха из-за щита и высокую степень турбулизации запыленного и загазованного воздуха в околощитовом пространстве, попадание его на рабочее место машиниста комбайна не наблюдалось.

В целом исследования показали, что предложенная схема всасывающего проветривания тупикового забоя калийного рудника при комбайновой выемке имеет высокую эффективность по нормализации пылевой и газовой обстановки. Данная схема основана на микрозонировании и выделении нового объекта проветривания – зоны дыхания, а также такого регулирования воздушных потоков в забое, чтобы в зону дыхания всегда попадал свежий воздух и не попадал загрязненный.

Одновременно были обнаружено два эффекта – существенное влияние конструкции комбайна и всех его двигателей на структуру вентиляционных потоков, на их высокую турбулизацию. Кроме того, наглядно было подтверждено, что даже небольшое количество свежего воздуха, совершенно недостаточное для разжижения всех вредностей, активно «прижимает» пыль и газ, вырывающиеся из-за щита в забой, к щиту, а затем и к всасу вентилятора пылеотсоса. При правильно организованном проветривании места погрузки с комбайна в бункер-перегрузатель удавалось полностью обеспечить рабочее место машиниста комбайна свежим воздухом.

### **Заключение**

Новая парадигма регулирования потоков воздуха и потоков пыли состоит в отказе от принудительного смешения этих потоков, к выделению микрозон и созданию такой структуры микроциркуляционных потоков между ними, чтобы пыль двигалась не через зону дыхания горнорабочих.

Дальнейшие исследования, по мнению авторов, должны проводиться по следующим: основным направлениям:

1. Регулирование воздушных потоков около бункера-перегрузателя как основного источника пыле- и газовыделения.
2. Применение легких пластиковых труб для транспортировки из забоя загрязненного воздуха при всасывающем проветривании.
3. Повышение эффективности всасывающего проветривания с вентиляторами большей производительности, а также с устройствами, регулирующими структуру потоков.

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 20-45-596020).*

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Медведев И.И. Аэрология калийных рудников / И.И. Медведев, А.Е. Красноштейн; УрО АН СССР. – Свердловск, 1990. – 251 с.: ил.
2. Землянова М.А., Зайцева Н.В., Шляпников Д.М., Маркович Н.И. Биохимические маркеры ранней диагностики производственно обусловленной гипертонической болезни у работников рудообогатительных производств // Медицина труда и промышленная экология. – 2016. – № 8. – С. 20–25.

3. Косяченко Г.Е. Условия труда и уровни пылевых нагрузок у горнорабочих калийных рудников Беларуси // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования. – 2018. – Т. 1. – С. 250–257.
4. Файнбург Г.З. Цифровизация процессов проветривания калийных рудников / ПНИПК, ГИ УрО РАН. – Пермь, Екатеринбург, 2020. – 421 с.
5. Файнбург Г.З., Семин М.А., Исаевич А.Г. Взаимосвязь физических механизмов, математических моделей и технических способов проветривания тупиковых горных выработок // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 131–137. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.25.
6. Файнбург Г.З., Исаевич А.Г. Анализ микроциркуляционных потоков между микронеонами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3. – С. 58–73. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-58-73.
7. Максимов А.Б. Повышение количества обогатимых классов в калийной руде, добываемой проходческо-очистными комбайнами "Урал-20Р" // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования. – 2018. – Т. 1. – С. 116–122.
8. Суханов А.Е., Шишлянников Д.И. Управление составом калийной руды на этапе добычи и транспортирования в условиях рудника // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования. – 2019. – Т. 1. – С. 63–68.
9. Исаевич А.Г., Кормщиков Д.С. Исследование пылевой обстановки в условиях калийного рудника, опыт снижения запыленности атмосферы рабочих мест // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2018. – № 4. – С. 60–74.
10. Левин Л.Ю., Исаевич А.Г., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горн. журн. – 2015. – № 1. – С. 72–75. – DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13.
11. Семин М.А., Исаевич А.Г., Жихарев С.Я. Исследование оседания пыли калийной соли в горной выработке // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 2. – С. 178–191. – DOI: 10.15372/FTPRPI20210218.
12. Файнбург Г.З., Овсянкин А.Д., Красюк Н.Ф., Вайсман О.Я., Шалаев С.Б., Забелин А.Ю. Проветривание тупиковых комбайновых забоев калийных рудников всасывающим способом // Разработка калийных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. / ППИ. – Пермь, 1989. – С. 153–159.