ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Технологии интенсивной разработки калийных пластов длинными очистными забоями на больших глубинах: актуальные проблемы, направления совершенствования

В.П.ЗУБОВ✉, Д.Г.СОКОЛ

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Зубов В.П., Сокол Д.Г. Технологии интенсивной разработки калийных пластов длинными очистными забоями на больших глубинах: актуальные проблемы, направления совершенствования // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 874-885. EDN YYMIQY

Аннотация. Приведены результаты анализа практического опыта разработки калийных пластов с использованием систем разработки длинными очистными забоями на рудниках ОАО «Беларуськалий». Отмечены позитивные изменения технико-экономических показателей рудников и повышение безопасности горных работ при внедрении ресурсосберегающих технологий без оставления целиков полезного ископаемого между выемочными столбами или с оставлением между столбами целиков с размерами, при которых происходит их разрушение горным давлением в выработанном пространстве. Отмечено, что использование очистных механизированных комплексов, характеризующихся высокой энерговооруженностью, в сочетании с большими глубинами разработки является главной причиной повышения температуры в лавах до величин, превышающих предельно допустимую температуру воздуха, регламентируемую санитарными нормами. На основании производственных исследований сделан вывод о том, что температурный режим по длине очистного забоя определяется температурой пород в выработанном пространстве лавы, тепловыделениями от оборудования энергопоезда и температурой массива полезного ископаемого впереди лавы. Сделан вывод о целесообразности использования в условиях глубоких горизонтов разработанных технологических схем, обеспечивающих снижение температуры в лавах на 6-9 °С и более за счет обособленного проветривания лавы и энергопоезда, а также теплообмена между струей воздуха, поступающего в лаву, и породами в выработанном пространстве.

***Ключевые слова*:** калийный пласт; ресурсосберегающие технологии; длинные очистные забои; температура воздуха; санитарные нормы; энерговооруженность; обособленное проветривание лавы и энергопоезда; теплообмен

Поступила: 08.05.2021 ***Принята: 21.07.2022*** ***Онлайн: 16.10.2023*** ***Опубликована: 25.12.2023***

Введение. Снижение потерь калийных и калийно-магниевых солей при их добыче, доля которых достигает 70 % и более, является одной из наиболее актуальных проблем мировой горной науки. Предпосылки для снижения потерь этого ценного невосполняемого природного ресурса создаются при использовании технологий выемки калийных пластов длинными очистными забоями. Особенности разработки и направления совершенствования технологических схем рассмотрены на примере рудников ОАО «Беларуськалий», где накоплен более чем 45-летний уникальный мировой практический опыт использования различных вариантов систем разработки длинными очистными забоями. Доля добычи калийных пластов с использованием системы разработки длинными очистными забоями на рудниках ОАО «Беларуськалий» достигает 90 % [1].

Существенный вклад в совершенствование технологий отработки калийных пластов, с учетом изменяющихся горно-геологических и горнотехнических условий, внесли Санкт-Петербургский горный университет, ОАО «Белгорхимпром», ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством» и др.

Практический опыт использования систем разработки длинными очистными забоями подтвердил выдвинутую в 2002-2003 гг. концепцию [2, 3] отработки основных продуктивных пластов ОАО «Беларуськалий», определившую направления совершенствования технологических схем рудников на следующие 17-18 лет. Основой данной концепции являлось положение «…о необходимости ведения очистных работ без оставления целиков полезного ископаемого между выемочными

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 874-885
© В.П.Зубов, Д.Г.Сокол, 2023

столбами или с оставлением между столбами податливых целиков с размерами, при которых происходит их разрушение горным давлением в выработанном пространстве».

В соответствии с указанной концепцией в настоящее время отрабатывают и проектируют к отработке [4] практически все панели по нижнему сильвинитовому пласту Третьего калийного горизонта, являющегося основным продуктивным пластом на рудниках ОАО «Беларуськалий». Это создало условия: для существенного повышения (с 60-70 до 85-90 %) [2, 5] извлечения полезного ископаемого; снижения вероятности внезапных выбросов соли и газа из пород почвы в выработанном пространстве лав нижнего технологического слоя, включающего 2-й и 3-й сильвинитовые слои [2, 6]; снижения опасности горных работ и больших невосполнимых потерь добычи, связанных с динамическими обрушениями пород кровли в выработанном пространстве лав нижнего технологического слоя [2, 6]. Технологические схемы без оставления целиков между выемочными столбами или с оставлением целиков, с размерами, при которых происходит их разрушение горным давлением в выработанном пространстве, относят к числу наиболее перспективных [5, 7, 8].

Рудники ОАО «Беларуськалий» характеризуются:

• динамичным ростом производственных мощностей, что связано с внедрением высокопроизводительных очистных механизированных комплексов;

• увеличением доли добычи с использованием ресурсосберегающих систем разработки длинными столбами;

• увеличением температуры вмещающих пород, что связано с интенсивной отработкой основных продуктивных пластов и переходом горных работ на более глубокие горизонты [9].

Оборудование лав новыми комбайнами серии SL с установленной мощностью электродвигателей 480-550 кВт позволяет увеличить добычу руды из лавы до 2,0 млн т в год [10]. Вместе с тем высокая энерговооруженность очистного оборудования в сочетании с фактически сложившимися горнотехническими условиями ведения горных работ [11-13] является одной из основных причин повышенной температуры воздуха в очистных забоях [14]. Практически во всех панелях при глубинах разработки продуктивных пластов более 500-600 м температура воздушных струй в комплексно-механизированных лавах существенно превышает (на 3-6 °С) предельно допустимую температуру воздуха, определенную по фактору «обеспечение условий для безопасного и производительного труда горнорабочих» и регламентируемую действующими нормативными документами.

В соответствии с СанПиН «Гигиенические требования к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных рудников» (п.24, глава 3) и правилами по обеспечению промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь (п.171) температура воздуха в очистных выработках не должна превышать 26 °С. При температуре воздуха на рабочем месте, равной 30 °С, продолжительность рабочего дня не может быть больше 5 ч, при 31 °С – 3 ч; 32 °С – 2 ч; 32,5 °С – 1 ч. Аналогичные требования предъявляются к температурному режиму на российских угольных шахтах в соответствии со статьями 209 и 212 ТК РФ. Невыполнение требований нормативных документов по температурному режиму отрицательно влияет на здоровье горнорабочих, способствует развитию профессиональных заболеваний, повышает риски производственного травматизма [15].

Известные подземные системы кондиционирования воздуха для снижения температуры воздуха в лавах [16, 17] не нашли широкого применения на рудниках ОАО «Беларуськалий» из-за существенных экономических затрат и сложности адаптации к применяемым ресурсосберегающим технологиям.

С учетом отмеченных фактов и актуализации социальных вопросов к числу основных направлений совершенствования перспективных ресурсосберегающих технологий отработки калийных пластов на рудниках ОАО «Беларуськалий» [9, 10, 18] следует отнести разработку организационно-технических решений, обеспечивающих тепловой режим в лавах, в соответствии с СанПиН «Гигиенические требования к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных рудников» и правилами по обеспечению промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь.

Цель исследований – разработка ресурсосберегающей системы отработки калийных пластов в условиях глубоких горизонтов, обеспечивающих снижение температуры воздуха в лавах, характеризующихся высокой энерговооруженностью очистного оборудования, без применения подземных систем кондиционирования воздуха (рис.1).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.П.Зубов, Д.Г.Сокол, 2023

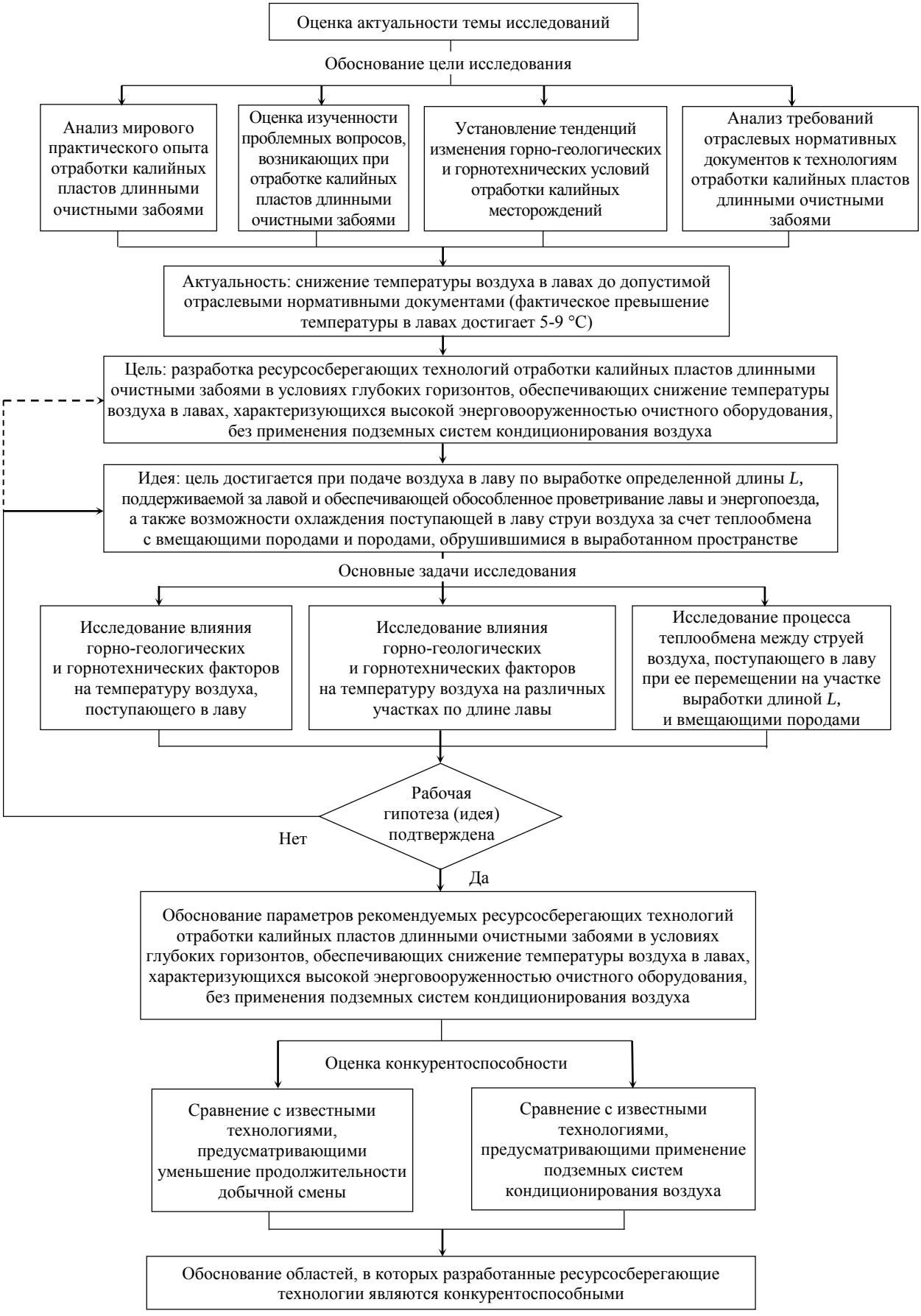


Рис.1. Алгоритм проведения исследований

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 874-885
© В.П.Зубов, Д.Г.Сокол, 2023

Дополнительные требования к разрабатываемой технологии:

• простота адаптации к сложившимся технологическим схемам рудников, схемам проветривания и транспорта;

• возможность опытно-промышленной проверки и внедрения на отрабатываемых участках (панелях);

• минимизация временных и финансовых затрат, связанных с внедрением разрабатываемых технических решений.

Методология. В соответствии с поставленной целью (рис.1) основными задачами шахтных исследований являлись:

• установление основных причин повышения температуры в лавах выше уровня температур, регламентируемых действующими нормативными документами, при применении типовых ресурсосберегающих систем разработки;

• исследование влияния горнотехнических факторов на формирование температуры воздушной струи, поступающей в лаву;

• исследование влияния горнотехнических факторов на температуру воздушной струи, проходящей по лаве.

Исследования проведены для типовых вариантов системы разработки длинными столбами (рис.2). Реализуются эти варианты при подготовке выемочных столбов транспортным и конвейерным штреками и подаче по ним свежей струи воздуха в лаву (рис.2, *а*) или в нижнюю половину лавы (рис.2, *б*), при проходке вентиляционного штрека в средней части выемочного столба. Реализация рассматриваемых вариантов возможна без оставления целиков полезного ископаемого или с оставлением между выемочными столбами целиков шириной Z_0 (рис.2), при которой происходит разрушение целиков в выработанном пространстве под воздействием горного давления.

Ширину целика Z_1 (рис.2, *а*) следует определять из условия обеспечения технологически удовлетворительного состояния вентиляционного штрека, а длину тупиковой части лавы l – из условия обеспечения ее проветривания. Во всех исследованных случаях лавы оборудованы механизированными комплексами Eickhoff SL-300/480 или Eickhoff SL-300/550 с установленной мощностью электродвигателей 480 и 550 кВт соответственно.

Использование данных технологий позволяет в благоприятных горно-геологических условиях достигать высоких среднесуточных нагрузок на очистные забои и обеспечивает низкую себестоимость добычи.

Экспериментальные производственные исследования проведены в следующих горно-геологических условиях. Глубина ведения горных работ от поверхности составляла 400-850 м. Основной продуктивный нижний сильвинитовый пласт Третьего калийного горизонта (Третий калийный пласт) включает шесть слоев сильвинита. Промышленное значение имеют слои 2, 3 и 4. При выемке продуктивный пласт делят на два технологических слоя, отрабатываемых в нисходящем порядке. Верхний технологический слой включает четвертый сильвинитовый слой мощностью 1,2 м, нижний – второй и третий сильвинитовые слои, промежуточный слой галита 2-3 суммарной мощностью около 2,0 м. Мощность пачки пород между верхним и нижним технологическими слоями составляет 0,9-1,1 м.

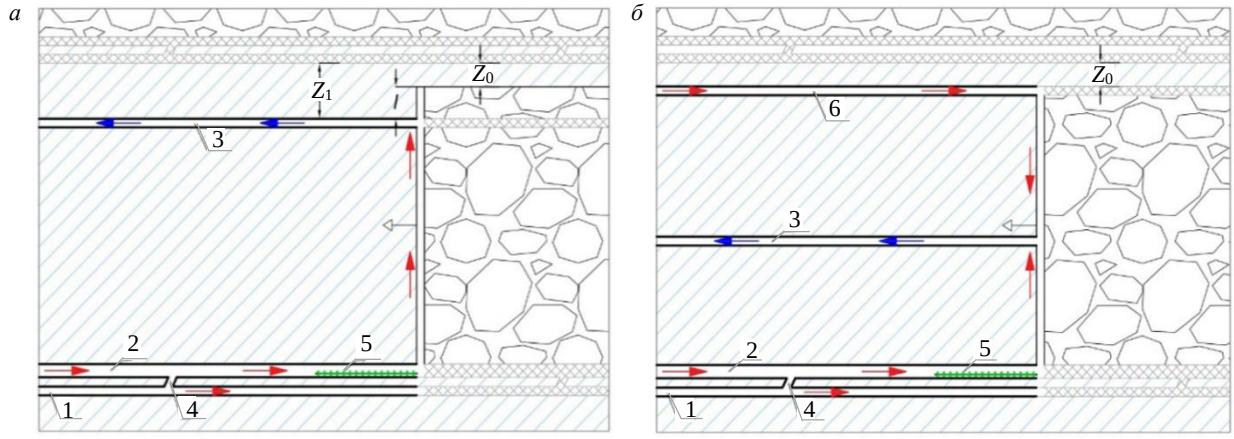


Рис.2. Принципиальные схемы типовых ресурсосберегающих систем разработки пласта длинными столбами
1, 2 – транспортный и конвейерный штреки; 3 – вентиляционный штрек; 4 – сбойка; 5 – энергопоезд; 6 – воздухоподающий штрек

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.П.Зубов, Д.Г.Сокол, 2023

Длина лав составляла 174-291 м, длина выемочных столбов – 4000 м. Во всех исследованных случаях энергопоезд лавы располагался в конвейерном штреке в непосредственной близости от лавы (рис.2). Длина участка штрека, на котором расположен энергопоезд, составляет 80-100 м. Следует отметить, что данную схему расположения энергопоезда относительно забоя лавы применяют на всех рудниках ОАО «Беларуськалий».

При проведении шахтных исследований измерялись следующие величины:

• температура воздуха в вентиляционной струе, предназначенной для проветривания лавы, по всей трассе ее перемещения с момента поступления в транспортный и конвейерный штреки (рис.2) до выхода струи с вентиляционного штрека в выработки главных направлений;

• температура пород, обрушившихся в выработанном пространстве лавы;

• температура массива полезного ископаемого впереди забоя лавы;

• температура воздуха в выработанном пространстве лавы.

Измерения температуры породных массивов, воздуха и оборудования, входящего в состав энергопоезда, проводились с использованием термометра контактного цифрового ТК-5.06 (рис.3). Электронный термометр ТК-5.06 включает электронный блок и сменные зонды, предназначенные для измерения температуры жидких, сыпучих и газообразных сред, поверхностей твердых тел и относительной влажности газообразных сред. В качестве термочувствительных элементов в зондах используются преобразователи термоэлектрические с номинальными статистическими характеристиками по ГОСТ Р 8.585. Электронный блок термометра преобразовывает сигнал, поступающий с выхода зонда, в сигнал измерительной информации, которая выводится на жидкокристаллический дисплей. Погрешность измерений прибора составляет ±0,5 °С при измерении температур в диапазоне от –40 до 100 °С.

Результаты исследований, выполненных в производственных условиях, показывают, что формирование теплового режима в лавах происходит по определенной схеме, одинаковой для всех исследованных участков. Начальные параметры воздуха, подаваемого в ствол, определяются климатическими условиями на поверхности и особенностями функционирования систем воздухоподготовки. При движении по выработкам околоствольного двора и магистральным воздухоподающим выработкам температура струи воздуха стремится к температуре нетронутого породного массива [9, 19]. Выравнивание температуры воздуха до температуры нетронутого массива горных пород происходит на расстоянии 2500-3000 м от воздухоподающих стволов. В дальнейшем существенные изменения температуры струи воздуха происходят в пределах выемочных участков (панелей) [20].

Установлено, что для всех рассмотренных горнотехнических ситуаций и вариантов систем разработки длинными столбами основными факторами, влияющими на температуру воздушной струи в лаве, являются: тепловыделения от энергопоезда; длина транспортного и конвейерного штреков (см. рис.2); температура пласта впереди забоя лавы и вмещающих пород; температура воздуха в выработанном пространстве лавы. При этом первые два фактора являются главными причинами формирования высоких температур на сопряжении лавы с конвейерным штреком (см. рис.2).

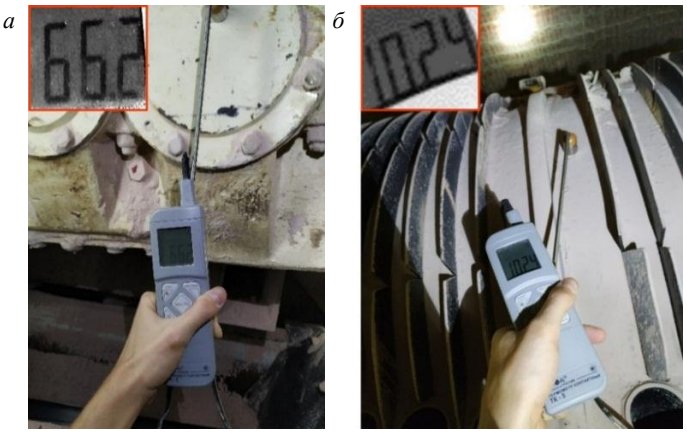


Рис.3. Измерение температуры оборудования в районе расположения редуктора штрекового скребкового конвейера СПШ-1-228 (*а*) и трансформаторной подстанции № 1 (*б*)

Температура оборудования, входящего в состав энергопоезда (рис.4), достигает в периоды добычных смен 100 °С и более (см. рис.3). В результате влияния тепловыделений от оборудования, входящего в состав энергопоезда, увеличение температуры струи воздуха составляет 10-15 °С. При этом наиболее существенное влияние на увеличение температуры струи воздуха, поступающего в лаву, оборудование энергопоезда оказывает на участке расположения установки для охлаждения электродвигателей и редукторов комбайна, а также на участке расположения трансформаторных подстанций. На этих участках температура воздуха достигает 34-35 °С, а в непосредственной близости от оборудования – 40-41 °С (рис.4).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 874-885
© В.П.Зубов, Д.Г.Сокол, 2023

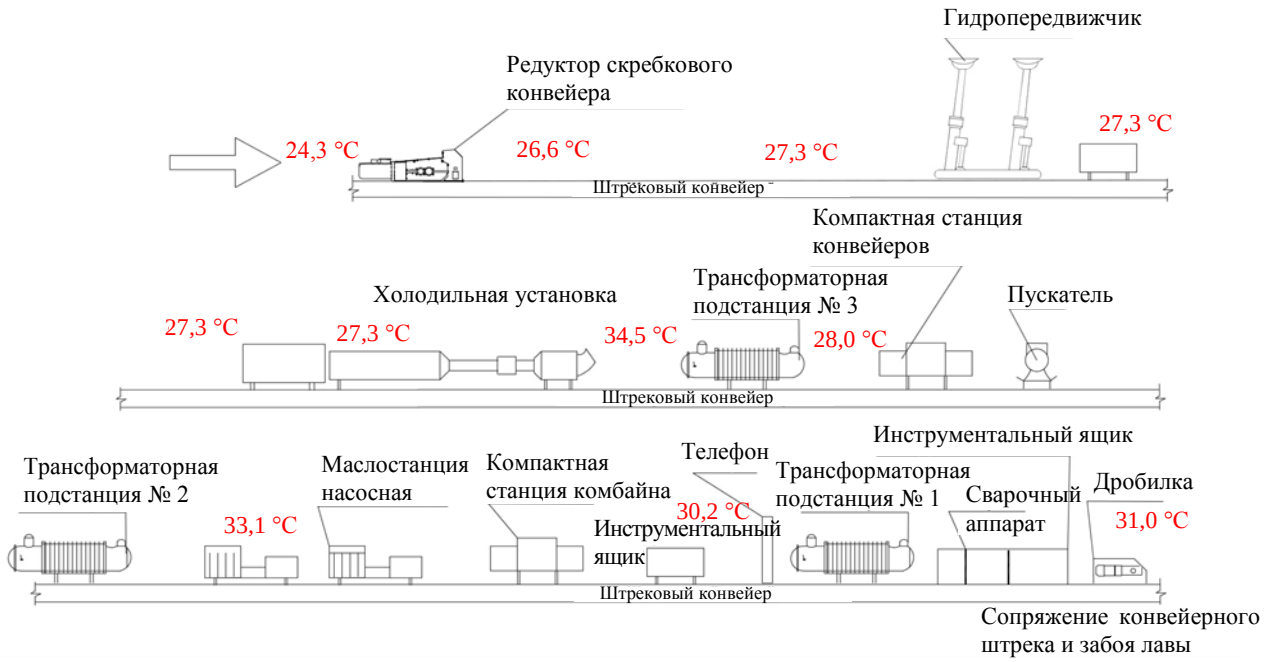


Рис.4. Результаты измерения температуры воздуха по длине энергопоезда (лава № 5-1, горизонт –440 м, рудник 4РУ) с использованием термометра ТК-5.06

В ряде случаев между участком конвейерного штрека с максимальными температурами и лавой зафиксированы периоды снижения на 2-10 °С и увеличения на 1-3 °С температуры воздуха. Указанные колебания связаны с поступлением в конвейерный штрек (см. рис.2) через сбойки струй воздуха из транспортного штрека, имеющих на соответствующих участках температуру значительно меньшую, чем температура воздуха в конвейерном штреке, где расположен энергопоезд. Разница между температурой воздуха на участке с максимальными значениями и температурой воздуха, поступающего в лаву, составляет 7-9 °С. Температура струи, входящей в лаву, достигает 32-34 °С и более.

Температура воздуха в транспортном штреке зависит главным образом от температуры породного массива, определяемой глубиной горных работ, длиной транспортного штрека и местом расположения рассматриваемого участка штрека относительно энергопоезда. На входе в транспортный штрек (сопряжение штрека с магистральными выработками) температура струи примерно равна температуре породного массива. В примерах, представленных на рис.5, температура породного массива составляет около 19 °С. При движении струи по транспортному штреку ее температура постепенно увеличивается, что связано с тепловыделениями конвейерных линий и поступлением воздуха из конвейерного в транспортный штрек через сбойки (см. рис.2). Максимальные значения приращений температуры в транспортном штреке зависят в основном от расстояния между лавой и сопряжением транспортного штрека с магистральными выработками. Данные приращения температуры в рассматриваемых горнотехнических условиях не превышали 2-3 °С. В ряде случаев на участке транспортного штрека (см. рис.2), отделенного от энергопоезда целиком шириной 3-4 м, зафиксировано возрастание температуры воздуха на 2-3 °С. При этом во всех исследованных ситуациях температура воздуха в транспортном штреке не превышала 25 °С.

После входа струи в лаву и при последующем движении по лаве температура воздуха постоянно снижается (рис.5). Снижение температуры происходит по закону, зависящему от температуры пласта полезного ископаемого, воздуха, обрушившихся пород в выработанном пространстве лавы и воздушной струи, поступающей в лаву. Охлаждение струи воздуха, проходящей по лаве, происходит за счет поступления из выработанного пространства в лаву воздуха с более низкой температурой. Более низкую температуру, чем проходящая по лаве струя воздуха, имеет также массив полезного ископаемого. Разность температур струи воздуха на входе в лаву и на выходе из нее составляет 6-10 °С. Для оценки температуры воздуха на различных участках по длине лавы можно использовать выражение

$$t_i = e^{at_0 - bx + 2{,}34},$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

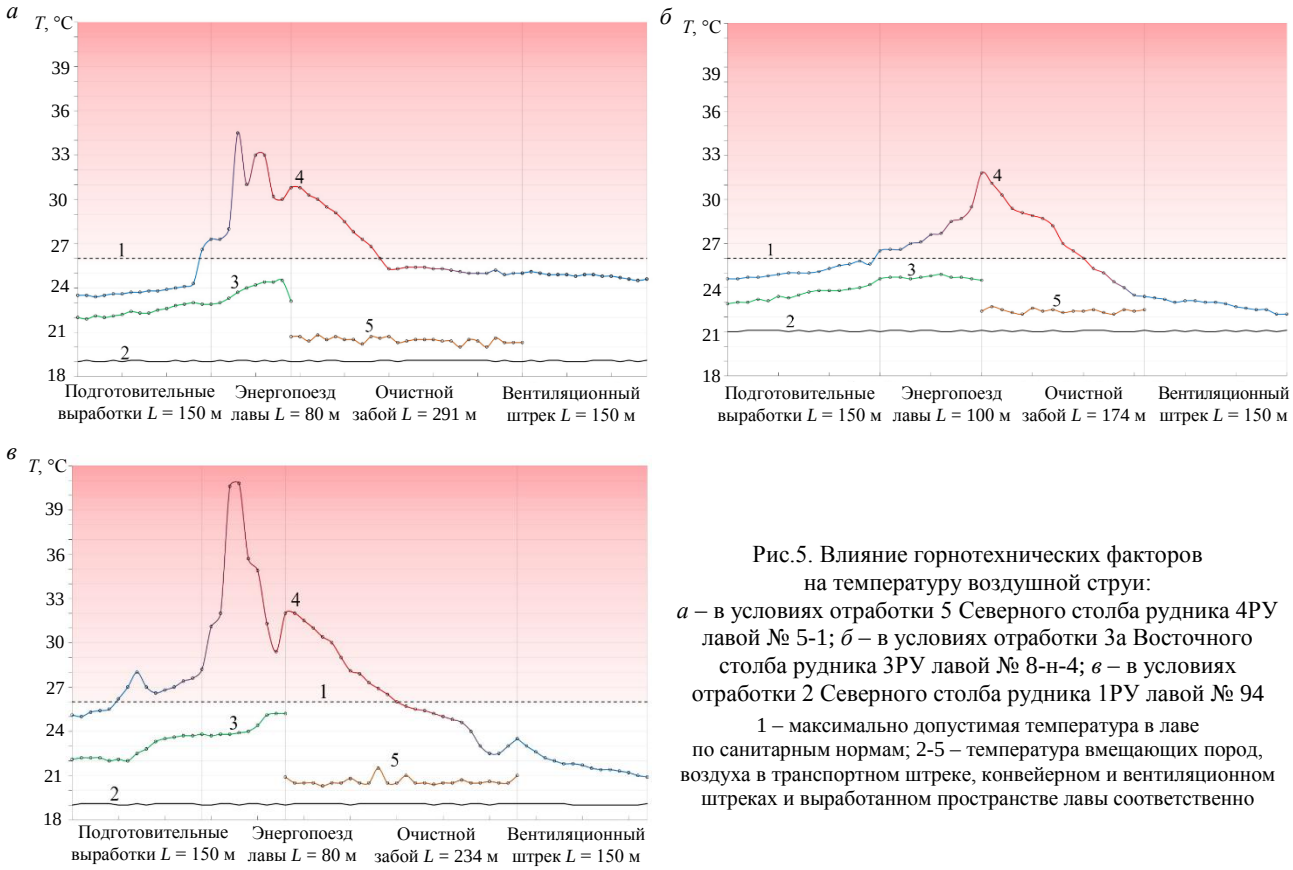


Рис.5. Влияние горнотехнических факторов на температуру воздушной струи:
а – в условиях отработки 5 Северного столба рудника 4РУ лавой № 5-1; *б* – в условиях отработки 3а Восточного столба рудника 3РУ лавой № 8-н-4; *в* – в условиях отработки 2 Северного столба рудника 1РУ лавой № 94
1 – максимально допустимая температура в лаве по санитарным нормам; 2-5 – температура вмещающих пород, воздуха в транспортном штреке, конвейерном и вентиляционном штреках и выработанном пространстве лавы соответственно

где t_0 – температура воздушной струи на сопряжении лавы с конвейерным штреком (см. рис.2); a, b – параметры, зависящие от специфики условий ведения очистных работ, для условий отработки Третьего калийного пласта a = 0,033, b = 0,0004.

Длина участка лавы, в пределах которой температура струи воздуха превышает 26 °С, достигает 60-100 % длины лавы. Длина участка зависит в основном от температуры воздуха на сопряжении конвейерного штрека с лавой, способа управления кровлей в лаве и глубины ведения горных работ.

В качестве примеров результатов выполненных исследований для типовых горнотехнических ситуаций приведены данные об изменении температуры воздушных струй по маршрутам их движения (см. таблицу, рис.5): в конвейерном и транспортном штреках, лавах, выработанных пространствах лав и вентиляционных штреках. Очистные работы в лавах велись по слоям 1, 1-2, 2 Второго калийного горизонта, а также по слоям 2, 2-3, 3 и слою 4 Третьего калийного горизонта с использованием механизированных комплексов Eickhoff SL-300/480, Eickhoff SL-300/550 и Eickhoff SL-300NE. Глубина работ от поверхности составляла 500-800 м, длина лав – 174-291 м.

Характеристика участков производственных исследований

Номер лавы, рудник	Очистной механизированный комплекс	Длина лавы, м	Глубина работ, м	Температура вмещающих пород, °С	Температура воздуха на сопряжении лавы с конвейерным штреком, °С	Длина участка лавы с температурой более 26 °С, %
94, 1РУ	Eickhoff SL-300/480	234	680-700	19	31-32	55
5-1, 4РУ	Eickhoff SL-300/550	291	617-732	19	31	40
104, 1РУ	Eickhoff SL-300/480	236	538-613	18	29-30	35
8-н-4, 3РУ	Eickhoff SL-300/480	174	764-802	21	31-32	65
4-в-4 3РУ	Eickhoff SL-300NE	250	733-764	21	29	60

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 874-885
© В.П.Зубов, Д.Г.Сокол, 2023

В рассматриваемых случаях температура воздуха на сопряжениях лав с конвейерными штреками составляла 29-32 °С, температура массива полезного ископаемого впереди забоя лавы – 18-21 °С, температура воздуха в выработанном пространстве – 19-23 °С. К моменту выхода из лавы температура отработанной струи снижалась до 20-25 °С. Далее на участке вентиляционного штрека длиной до 300-350 м температура воздушной струи уменьшилась до температуры вмещающих пород, равной примерно 19-23 °С. При проведении инструментальных наблюдений на глубинах ведения очистных работ до 850-900 м температура породного массива более 23 °С не зафиксирована. Температура струи воздуха в транспортных штреках по мере приближения к лаве возрастала до 22-25 °С.

Обсуждение. При поиске решений, обеспечивающих достижение поставленной цели (см. рис.1), особого внимания заслуживают данные, установленные при проведении производственных исследований:

• Основным фактором, оказывающим определяющее влияние на температуру воздуха в лавах на рудниках ОАО «Беларуськалий» при использовании типовых ресурсосберегающих систем разработки длинными столбами (см. рис.2), является тепловое излучение оборудования, входящего в состав энергопоезда, расположенного в конвейерном штреке в непосредственной близости от лавы. В результате воздействия этого фактора температура поступающего в лаву воздуха возрастает на 5-9 °С.

• В рассматриваемом диапазоне глубин ведения горных работ (500-900 м) температура массива вмещающих пород, воздуха в выработанном пространстве и массива полезного ископаемого впереди очистного забоя меньше предельно допустимой температуры воздуха (26 °С) в лаве на 2-10 °С, что указывает на потенциальную возможность использовать эти природные объекты для снижения температуры в лаве.

На начальном этапе исследований проанализированы варианты исключения отрицательного влияния энергопоезда на тепловой режим в лаве, предусматривающие изменение места расположения энергопоезда относительно свежей струи воздуха, поступающей в лаву [21, 22]. Данный анализ показал, что размещение энергопоезда на выработках с исходящими струями воздуха практически трудно осуществимо в связи с рядом ограничений по промышленной безопасности и возникновением дополнительных рисков нарушения непрерывности производства.

Основная идея заключается в разработке пространственно-планировочных решений, включающих подачу воздуха в лаву по участку конвейерного штрека определенной длины, поддерживаемого за лавой на границе с выработанным пространством, что обеспечивает возможность: обособленного проветривания лавы и энергопоезда, что исключает влияние энергопоезда на температуру струи воздуха, поступающего в лаву; снижение температуры воздуха, поступающего в лаву, за счет теплообмена с вмещающими породами на участке штрека, поддерживаемого за лавой. При реализации идеи возможность регулирования температуры воздуха, поступающего в лаву, до требуемой величины обеспечивается изменением длины поддерживаемого за лавой участка штрека. Минимально необходимая длина данного участка принимается из условия обеспечения температуры воздуха на входе в лаву, равной 26 °С.

На рис.6 представлены рекомендуемые варианты ресурсосберегающей системы разработки калийных пластов в условиях глубоких горизонтов, обеспечивающие снижение температуры воздуха в лавах, характеризующихся высокой энерговооруженностью очистного оборудования, без применения подземных систем кондиционирования воздуха. Основным является вариант, представленный на рис.6, *а*, второй (рис.6, *б*) рекомендуется использовать при невозможности реализации основного варианта.

При применении варианта, представленного на рис.6, *а*, струю воздуха для проветривания лавы и энергопоезда подают по транспортному штреку до сбойки, которая расположена на расстоянии L от лавы. Далее свежая струя следует по участку конвейерного штрека, расположенному между сбойкой и лавой. На сопряжении лавы и конвейерного штрека происходит разделение струи воздуха – основная часть поступает в забой лавы и далее в вентиляционный штрек, оставшаяся – к месту расположения энергопоезда. От энергопоезда струя воздуха с повышенной температурой отводится к вентиляционному штреку по вспомогательной диагональной выработке. Для регулирования объема воздуха, поступающего к энергопоезду, в конвейерном штреке и вспомогательной

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

диагональной выработке устанавливают временные перемычки с окнами. Как показали результаты выполненных исследований, температура воздуха, поступающего из транспортного штрека в сбойку на глубинах ведения очистных работ до 900 м в самых неблагоприятных ситуациях, связанных с поступлением воздуха из конвейерного штрека в транспортный, не превышает 29 °С. Снижение температуры струи воздуха, поступающей в лаву, обеспечивается за счет теплообмена между данной струей и вмещающими породами при ее движении на участке L конвейерного штрека, поддерживаемого за линией очистного забоя. С учетом характера изменения температуры воздуха по длине лавы (см. рис.5), при величине расстояния 100-120 м снижение температуры воздуха на участке конвейерного штрека, поддерживаемого за лавой, составит не менее 3 °С. При использовании варианта системы разработки с обособленным проветриванием энергопоезда и лавы температура струи воздуха на входе в лаву на глубинах до 900 м не превысит 24-26 °С.

Дополнительное снижение температуры воздуха в призабойном пространстве лавы возможно при подаче определенного объема воздуха из транспортного штрека в лаву через выработанное пространство (рис.6), что может быть достигнуто, например, при откреплении в породной полосе вспомогательных выработок. Допустимость использования данной рекомендации в каждом конкретном случае требует дополнительного обоснования ее соответствия действующим правилам безопасности.

Устойчивость участка конвейерного штрека длиной L за лавой может достигаться известными способами охраны (например, могут применяться породные полосы, крепи различных конструкций и др.) [23-28]. При этом применяемый способ охраны должен обеспечить сохранение сечения штрека, достаточного для подачи количества воздуха, необходимого для проветривания лавы и энергопоезда (рис.6), в течение времени прохождения лавой расстояния L. Для исключения полного заполнения штрека породой в процессе возведения закладочного массива на крайней секции крепи сопряжения устанавливается отбойный щит.

Параметр L является технически легко регулируемым в период отработки столба, что позволяет рассматривать увеличение L как реально осуществимый способ снижения температуры воздуха, поступающего в лаву, не только при использовании схемы с обособленным проветриванием лавы и энергопоезда (рис.6, *а*), но и при последовательном проветривании энергопоезда и лавы (рис.6, *б*). При определении минимально необходимой длины участка L, при снижении которой температура поступающей в лаву струи воздуха будет меньше 26 °С, принят метод, широко применяемый при решении задач шахтной теплофизики, основанный на использовании коэффициента нестационарного теплообмена [29, 30]:

$$k_t = \left(T_{\text{п}} - T_{\text{в}}\right)^{-1} q\left(P,t\right) = a\left(\frac{T_{\text{ст}}(t) - T_{\text{в}}}{T_{\text{п}} - T_{\text{в}}}\right);$$

$$T_{\text{ст}}(t) = T\left(P,t\right),$$

где $T_{\text{в}}$ – средняя температура воздуха, °С; $T_{\text{ст}}(t)$ – температура на стенке выработки, °С; $T_{\text{п}}$ – температура породного массива, °С; a – коэффициент теплообмена стенки с воздухом.

Применительно к рассматриваемой задаче минимально необходимая длина L поддерживаемого за лавой участка конвейерного штрека с достаточной для практических целей точностью может быть определена по методике, приведенной в работе [31]:

$$L = \frac{P_{air} C_{air} Q}{P k_t} \ln\left(\left|\frac{T_A - T_{\text{п}}}{T_B - T_{\text{п}}}\right|\right),$$

где P_{air} – плотность воздуха, кг/м^3; C_{air} – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг · К); Q – текущий расход воздуха в транспортном штреке, для которого указано изменение температуры, м^3/с; P – периметр поперечного сечения транспортного штрека, м; k_t – коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/м^2; T_A – температура воздуха на сопряжении в транспортном штреке на линии с очистным забоем лавы, °С; T_B – температура воздуха на сопряжении лавы с конвейерным штреком после теплообмена со стенками, °С.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 874-885
© В.П.Зубов, Д.Г.Сокол, 2023

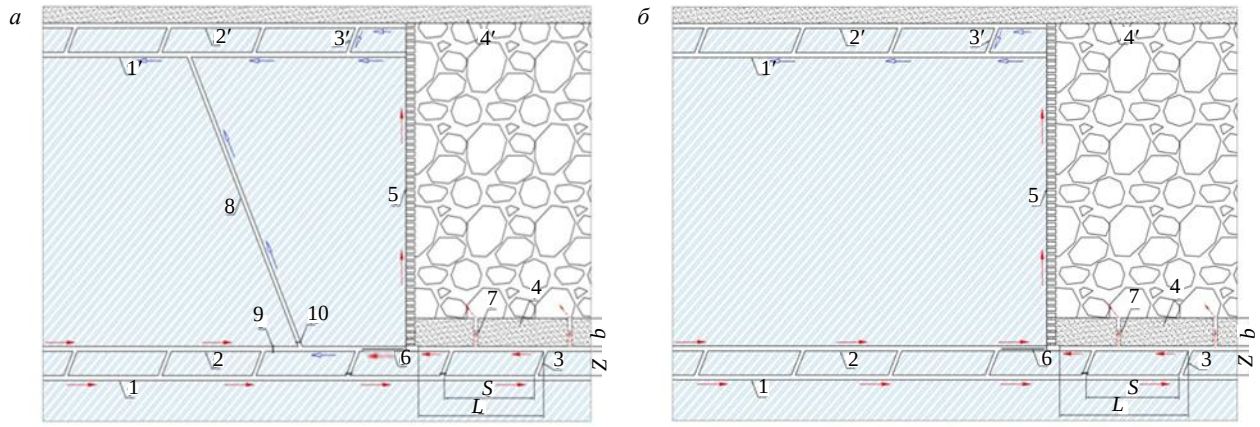


Рис.6. Ресурсосберегающие технологические схемы, рекомендуемые для использования при высокой энерговооруженности очистного оборудования при обособленном (*а*) и последовательном (*б*) проветривании энергопоезда и лавы

1 – транспортный штрек; 2 – конвейерный штрек; 3 – сбойка; 1′ – вентиляционный штрек; 2′ – вентиляционный ходок; 3′ – вентиляционная сбойка; 4 – породная полоса; 5 – лава; 6 – энергопоезд; 7 – вспомогательная выработка; 8 – вспомогательная диагональная выработка; 9, 10 – временные перемычки с окнами; *Z* – ширина целика; *b* – ширина породной полосы

Выполненные исследования показали (рис.7), что температура воздуха, поступающего в выработку (см. рис.6, *а*), и минимально необходимая длина *L* поддерживаемого за лавой участка конвейерного штрека существенно зависят от расстояния между лавой и магистральным воздухоподающим штреком.

При технико-экономической оценке альтернативных способов обеспечения требуемого теплового режима в лавах необходимо учитывать, что рекомендуемые варианты систем разработки длинными забоями (см. рис.6) легко адаптируются к фактически сложившимся технологическим схемам, применяемым на рудниках ОАО «Беларуськалий», и характеризуются минимальными энергетическими затратами. Данные схемы могут быть использованы как при проектировании новых горизонтов, так и в отрабатываемых панелях.

Заключение. Применяемые на рудниках ОАО «Беларуськалий» системы разработки длинными столбами с использованием в лавах высокопроизводительного очистного оборудования с высокой энерговооруженностью не обеспечивают создание в лавах теплового режима в соответствии с СанПиН «Гигиенические требования к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных рудников» и правилами по обеспечению промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь. Температура воздуха в призабойном пространстве лав, работающих на глубинах более 500 м, как правило, превышает предельно допустимое значение 26 °С.

При использовании известных технологий отработки калийных пластов длинными очистными забоями с использованием высокопроизводительных очистных механизированных комплексов определяющее влияние на температуру поступающего в лаву воздуха оказывают глубина горных работ, расстояние от лавы до магистральной воздухоподающей выработки и место расположения энергопоезда лавы. В условиях рудников ОАО «Беларуськалий» при расположении энергопоезда в конвейерном штреке впереди забоя лавы температура струи воздуха на входе в лаву превышает на 6-9 °С ее предельно допустимые значения, регламентируемые санитарными нормами.

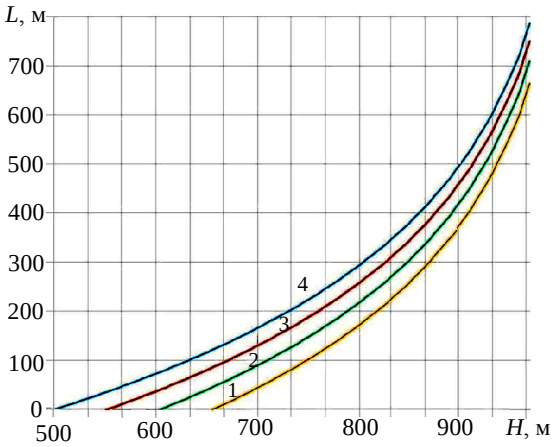


Рис.7. Зависимость минимально необходимой длины поддерживаемого за лавой участка воздухоподающей выработки от глубины ведения очистных работ при расстоянии между лавой и магистральным воздухоподающим штреком:

1 – 1000; 2 – 2000; 3 – 3000; 4 – 4000 м

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

При движении воздушной струи в призабойном пространстве лавы уменьшается ее температура от максимальных значений на входе струи в лаву до минимальных значений на выходе струи из лавы. Разность минимальных и максимальных значений температур в исследованных условиях составляет 6-10 °С. Основное влияние на закономерность изменения температуры при движении струи от конвейерного штрека к вентиляционному оказывают температура пород в выработанном пространстве лавы и температура массива полезного ископаемого впереди забоя лавы.

При отработке калийных пластов на глубинах до 800-900 м лавами, характеризующимися высокой энерговооруженностью очистного оборудования, снижение температуры воздуха в призабойном пространстве лав без применения подземных систем кондиционирования воздуха достигается при использовании разработанной патентоспособной технологии, включающей подачу воздуха к лаве по поддерживаемому за лавой участку конвейерного штрека определенной длины и обособленное проветривание лавы и энергопоезда. При использовании данной технологии, не требующей дополнительных энергетических затрат, температура струи воздуха на входе в лаву на глубинах до 800-900 м не превышает 24-26 °С.

Применение разработанной технологии в горно-геологических условиях отработки Третьего калийного пласта на рудниках ОАО «Беларуськалий» по сравнению с использованием вариантов организации работ в лавах, предусматривающих снижение продолжительности добычной смены при температуре воздуха в лаве, превышающей 26 °С, позволяет увеличить среднесуточную добычу из лавы не менее чем на 15-17 % и снизить участковую себестоимость добычи на 12-15 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дешковский В.Н., Данилова А.Ф., Новокшонов В.Н.* Сдвижения массива горных пород в результате его подработки столбовой системой разработки в условиях Старобинского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 11. С. 80-86.

2. *Зубов В.П., Смычник А.Д., Кириенко В.М., Дакуко Н.А.* Концепция отработки Третьего калийного пласта на рудниках РУП ПО «Беларуськалий» // Горная механика. 2005. № 4. С. 66-71.

3. *Смычник А.Д., Зубов В.П., Калугин П.А., Кириенко В.М.* Технологические схемы рудников ПО «Беларуськалий»: состояние, проблемы, перспективы совершенствования // Горный журнал. 2003. № 7. С. 45-50.

4. *Подлесный И.А., Гетманов В.Н., Петровский Б.И., Носуля И.Е.* Технологии слоевой выемки при разработке пласта Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения // Горный журнал. 2018. № 8. С. 59-63. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.08

5. ОАО «Беларуськалий»: технология ведения горных работ. URL: https://www.kali.by/production/technology/technology_of_mining/ (дата обращения 29.04.2021).

6. *Зубов В.П., Смычник А.Д.* Внезапные выбросы соли и газа в калийных рудниках и их предупреждение // Горный журнал. 1998. № 11-12. С. 85-87.

7. *Сокол Д.Г., Ле Куанг Фук, Тхан Ван Зуи.* Актуальные проблемы и перспективы совершенствования охраны повторно используемых подготовительных выработок при отработке калийных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 33-43. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-33-43

8. *Кологривко А.А., Дакуко С.Н.* Технологические схемы бесцеликовой отработки калийных пластов в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях // Горная механика. 2009. № 4. С. 48-59.

9. *Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Бутаков С.В., Семин М.А.* Нормализация микроклиматических условий горных выработок при отработке глубокозалегающих запасов калийных рудников // Горный журнал. 2018. № 8. С. 97-102. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.14

10. *Головатый И.И.* ОАО «Беларуськалий» – крупнейший мировой производитель калийных удобрений // Горный журнал. 2018. № 8. С. 4-9.

11. *Соловьев Д.Е., Хохолов Ю.А.* Прогноз теплового режима рудника с учетом динамики развития горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 5. С. 270-275.

12. *Мартынов А.А., Лунев С.Г., Яковенко А.К.* Прогнозирование и разработка комплекса мер по нормализации тепловых условий в горных выработках глубоких угольных шахт на ПЭВМ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 2. С. 130-133.

13. *Кологривко А.А.* Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2014. № 16. С. 101-110.

14. *Manohar Rao A., Ramalingeswarudub S.V.S.S., Venkateswarlu G.* Planning of Ventilation Requirements for Deep Mechanised Long wall Faces – A Case Study of Adriyala Longwall Project of The Singareni Collieries Company Limited (SCCL) // Procedia Earth and Planetary Science. 2015. Vol. 11. P. 548-556. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.057

15. *Brake D.J.* The Deep Body Core Temperatures, Physical Fatigue and Fluid Status of Thermally Stressed Workers and the Development of Thermal Work Limit as an Index of Heat Stress. Perth: Curtin University, 2002. 294 p.

16. *Мартынов А.А., Яковенко А.К., Олексюк А.Б.* Системы и средства локального охлаждения рудничного воздуха в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № S12. С. 132-140.

17. *Медведев И.И., Красноштейн А.Е.* Аэрология калийных рудников. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 251 с.

18. *Алабьев В.Р.* Основные направления развития способов и средств охлаждения воздуха в угольных шахтах Украины // Вестник Забайкальского государственного университета. 2014. № 6 (109). С. 35-46.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

19. *Зайцев А.В., Семин М.А., Клюкин Ю.А.* Исследование критериев нормирования микроклиматических условий в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 12. С. 151-156.

20. *Карелин В.Н., Кравченко А.В., Левин Л.Ю. и др.* Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников // Горный журнал. 2013. № 6. С. 65-68.

21. *Belle B., Biffi M.* Cooling pathways for deep Australian longwall coal mines of the future // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 6. P. 865-875. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.02.001

22. *Gangrade V., Schatzel S.J., Harteis S.P.* A Field Study of Longwall Mine Ventilation Using Tracer Gas in a Trona Mine // Mining, Metallurgy & Exploration. 2019. Vol. 36. Iss. 6. P. 1201-1211. DOI: 10.1007/s42461-019-0096-0

23. *Chen Jie, Liu Jian-xing, Jiang De-yi et al.* An experimental study of strain and damage recovery of salt rock under confining pressures // Rock and Soil Mechanics. 2016. Vol. 37. № 1. P. 105-112. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.01.012

24. *Litvinenko V.* Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. International European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2018, 22-26 May 2018, Saint Petersburg, Russian Federation. London: Taylor and Francis Group, 2018. Vol. 1. P. 3-16.

25. *Еременко В.А., Галченко Ю.П., Косырева М.А.* Оценка влияния геометрических параметров традиционно применяемых и природоподобных систем подземной разработки рудных месторождений на исходное поле напряжений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 3. С. 98-109. DOI: 10.15372/FTPRPI20200310

26. *Прушак В.Я.* Деформирование контура горных выработок Старобинского месторождения калийных солей при различных глубинах заложения // Доклады НАН Беларуси. 2016. Т. 60. № 2. С. 97-101.

27. *Guorui Feng, Pengfei Wang, Chugh Y.P.* A New Gob-Side Entry Layout for Longwall Top Coal Caving // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 5. № 1292. DOI: 10.3390/en11051292

28. *Zhijun Tian, Zizheng Zhang, Min Deng et al.* Gob-Side Entry Retained with Soft Roof, Floor, and Seam in Thin Coal Seams: A Case Study // Sustainability. 2020. Vol. 12. Iss. 3. № 1197. DOI: 10.3390/su12031197

29. *Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я.* Руководство по регулированию теплового режима шахт. М.: Недра, 1977. 359 с.

30. *Щербань А.Н., Кремнев О.А.* Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2-х томах. Т. 2. Киев: Изд-во АН УССР, 1960. 347 с.

31. *Красноштейн А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В.* Моделирование процессов нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 5. С. 77-85.

Авторы: **В.П.Зубов,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой, spggi_zubov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1215-4173 (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)*, **Д.Г.Сокол,** *аспирант, https://orcid.org/0000-0002-5509-7001 (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0