

М.В. Каймонов, Ю.А. Хохолов, А.С. Курилко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ВОЗДУХА НА ПРОЦЕССЫ
КОНДЕНСАЦИИ ВЛАГИ И СМЕРЗАНИЯ ОТБИТОЙ
РУДЫ В ОЧИСТНЫХ БЛОКАХ РУДНИКОВ
КРИОЛИТОЗОНЫ**

В статье приведены результаты исследований влияния температуры и влагосодержания воздуха на процессы конденсации влаги и смерзания отбитой руды в очистных блоках рудников криолитозоны. Показано, что интенсивность льдонакопления в пустотах блока возрастает с увеличением разности температур рудничного воздуха и поверхности кусков мёрзлой руды, а также с ростом относительной влажности рудничного воздуха.

Ключевые слова: рудники, очистные зоны, мерзлая руда, конденсация влаги.

Неделя горняка

Значительные запасы ценных полезных ископаемых сосредоточены в регионах Севера и Северо-Востока России, освоение которых требует решения целого ряда сложных организационных и инженерных задач как при открытой, так и подземной добыче. Природными особенностями этих регионов, наиболее осложняющими процессы добычи, являются повсеместное распространение многолетней мерзлоты и низкая среднегодовая температура наружного воздуха. Отбитые горные породы в условиях отрицательных температур смерзаются, что затрудняет их добычу. Годовой экономический ущерб по причине смерзания отбитой горной массы, обусловленный отсутствием эффективных средств предотвращения смерзания или быстрого восстановления сыпучести, исчисляется сотнями миллионов рублей. Особую сложность проблема смерзания отбитых пород приобретает при веде-

нии подземных горных работ на мерзлотных горизонтах. На процесс смерзания мёрзлой руды влияют температурно-влажностный и вентиляционный режимы рудника, физико-технические параметры и теплофизические свойства отбитой руды и т.д.

Проведённые натурные исследования по определению физико-технических характеристик отбитой руды и вмещающих пород рудника «Айхал», а также анализ литературных данных показал, что гранулометрический состав взорванной массы, её пористость после взрыва могут сильно отличаться. Пористость блока отбитой руды изменяется в зависимости от крепости отбиваемых пород, применяемой технологии и условий взрывной отбойки (в зажатой среде, на свободное пространство и т.д.).

Имеется множество попыток теоретически установить зависимость проницаемости от геометрической

структуры пористой среды, т.е. размеров и форм частиц и системы их упаковки, исходя из законов Пуазейля для ламинарного движения в трубах и Стокса для обтекания частиц при той или иной схематизированной модели пористой среды — набор сферических частиц (фиктивный грунт Сликтера), система параллельных капилляров (идеальный грунт) и т.д. Но, к сожалению, до сих пор по этому вопросу нет общего мнения и универсальных теоретических представлений.

Следует отметить, что здесь возможно применение разнообразных математических моделей, основанных на различном модельном представлении пористой среды, которой, несомненно, является взорванная горная порода.

Так крупнообломочные горные породы с небольшим количеством мелкодисперсной фракции характеризуются наличием достаточно крупного среднего куска породы, сравнительно небольшой удельной поверхностью и высокой проницаемостью. Так же в теплофизических расчётах большое значение имеет размер кусков, т.к. для больших кусков необходимо учитывать эффект «тепловой инерции». Т.е. существенное значение будет иметь разность температур внутри и на поверхности куска породы. В этом случае, по нашему мнению, в качестве модели пористой среды можно предложить модель прямых параллельных каналов постоянного диаметра [1].

Как показал обзор литературы и проведённые нами исследования, при фильтрации рудничного воздуха через пустоты отбитой руды происходит конденсация влаги на поверхности кусков горных пород. Интенсивность этого процесса определяется в ос-

новном разностью температур воздуха и кусков пород. При отрицательной температуре сконденсированная на поверхности отдельных кусков влага может превратиться в лед, который заполняет пустоты, что может привести к смерзанию отбитой руды в блоке.

Процесс смерзания мерзлой руды в блоке является сложным и зависит от многих факторов, что приводит к рассмотрению многофакторной модели, поскольку существенную роль играет взаимовлияние факторов. На основе разработанной математической модели теплообмена рудничного воздуха с отбитой мерзлой рудой в качестве примера проведены численные расчёты при следующих исходных данных: удельная теплоемкость мерзлой руды $840 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; удельная теплоемкость талой руды $940 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; плотность руды 2400 кг/м^3 ; коэффициент теплопроводности мерзлой руды $2,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; коэффициент теплопроводности талой руды $1,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; высота блока $H = 20 \text{ м}$; депрессия блока $h = 400 \text{ Па}$; пустотность блока $m_0 = 20 \%$; температура входящего воздуха $\theta_0 = +3 \text{ }^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха $\varphi = 100 \%$; начальная температура отбитой руды $T_0 = -4 \text{ }^\circ\text{C}$; начальная (внутренняя) влажность отбитой руды $w = 0,1 \text{ д.е.}$, средний размер куска отбитой руды $d=0,1 \text{ м}$.

По мере остывания воздуха происходит конденсация влаги. Динамика изменения накопленной влаги по высоте блока приведена на рис. 1. Как видно из графиков уже через 48 часов в нижней части блока происходит накопление влаги до $1,5 \%$. Распределение конденсата имеет характерный «горб», который в течение времени сдвигается по высоте (к верхней границе блока).

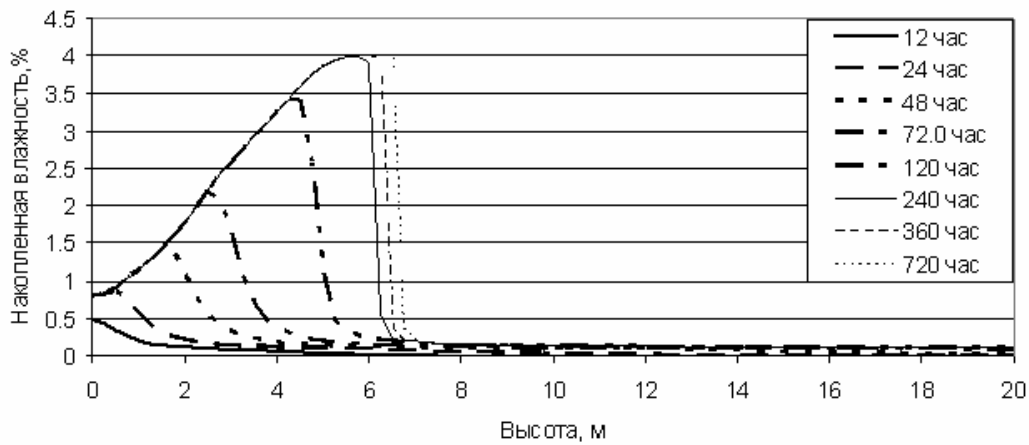


Рис. 1. Динамика суммарного влагонакопления (вода+лёд) в блоке отбитой руды:
 $(\theta_0=+3\text{ }^\circ\text{C}; T_0 = -4\text{ }^\circ\text{C}; m_0=0,2; h = 400\text{ Па})$

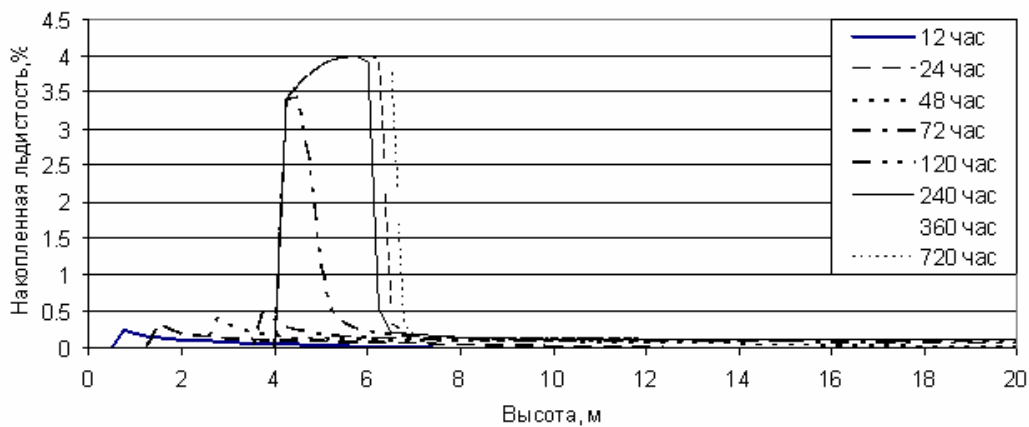


Рис. 2. Динамика льдонакопления в блоке отбитой руды
 $(\theta_0=+3\text{ }^\circ\text{C}; T_0 = -4\text{ }^\circ\text{C}; m_0=0,2; h = 400\text{ Па})$

В зоне с положительной температурой руды влага находится в жидком состоянии, а в зоне с отрицательной температурой — в твёрдом состоянии в виде инея. Изменение содержания льда по высоте блока отбитой руды показано на рис. 2.

Как видно из графиков, в течение первых 48 часов льдосодержание возрастает до 0,5 %, через 120 часов — 3,5 %, через 240 часов — 4 %.

Наиболее интенсивно накопление льда в пустотах отбитой руды наблюдается в первые 240 часов. Кривая льдосодержания также имеет характерный «горб», который с течением времени перемещается к верхней границе блока отбитой руды. Руда в зонах интенсивного льдонакопления может смерзнуться. Опасность смерзания тем выше, чем больше накапливается льда.

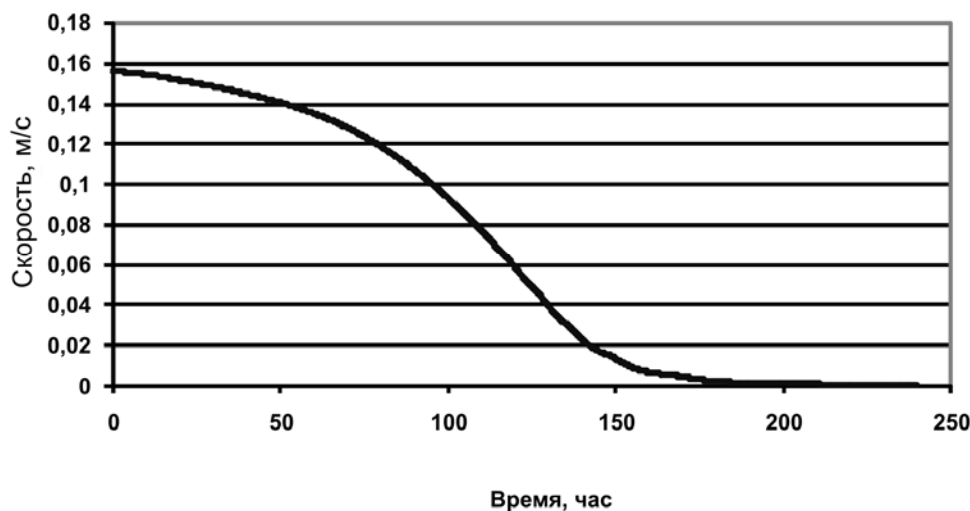


Рис. 3. Динамика скорости фильтрации в блоке отбитой руды ($\theta_0 = +3^\circ\text{C}$; $T_0 = -4^\circ\text{C}$; $m_0 = 0,2$; $h = 400 \text{ Па}$)

Расчеты показали, что максимальное значение накопленной влаги в виде льда может составить 4 %, что происходит по истечении 240 часов, далее накопление влаги (конденсата) резко замедляется. Это объясняется тем, что из-за намерзания конденсата и соответственно уменьшения диаметра каналов, происходит рост их аэродинамического сопротивления и, как следствие этого, снижается пропускная способность. Впоследствии, через определённое время фильтрация воздуха полностью прекращается из-за закупорки каналов инеем. Для приведённого варианта расчета динамика изменения скорости фильтрации воздуха показана на рис. 3. Как видно из графика, через 200 часов движение воздуха в каналах отбитой руды практически прекращается.

Результаты численных расчетов показали, что при фильтрации воздуха через блок отбитой мерзлой руды в его нижней части постепенно образу-

ется зона максимального льдонакопления за счет конденсации и замерзания влаги. На практике это может привести к образованию сплошной льдопородной плиты, что недопустимо с позиций ограничения выпуска. В соответствии с расчетами, максимальное значение накопленной влаги может достигать 3—4 %, а в экспериментальных исследованиях, как было установлено в главе 3, смерзание происходит при поверхностной влажности 1,5—2 %, что в 2 раза ниже значений, полученных в расчетах. Таким образом, разработанная методика расчета позволяет определить глубину и скорость льдонакопления, приводящего к смерзанию отбитой руды, что немаловажно для практики. Прогноз динамики льдонакопления важен для разработки рекомендаций и превентивных мероприятий по предупреждению этих негативных процессов.

Как уже отмечалось, на процессы тепломассообмена в блоке отбитой

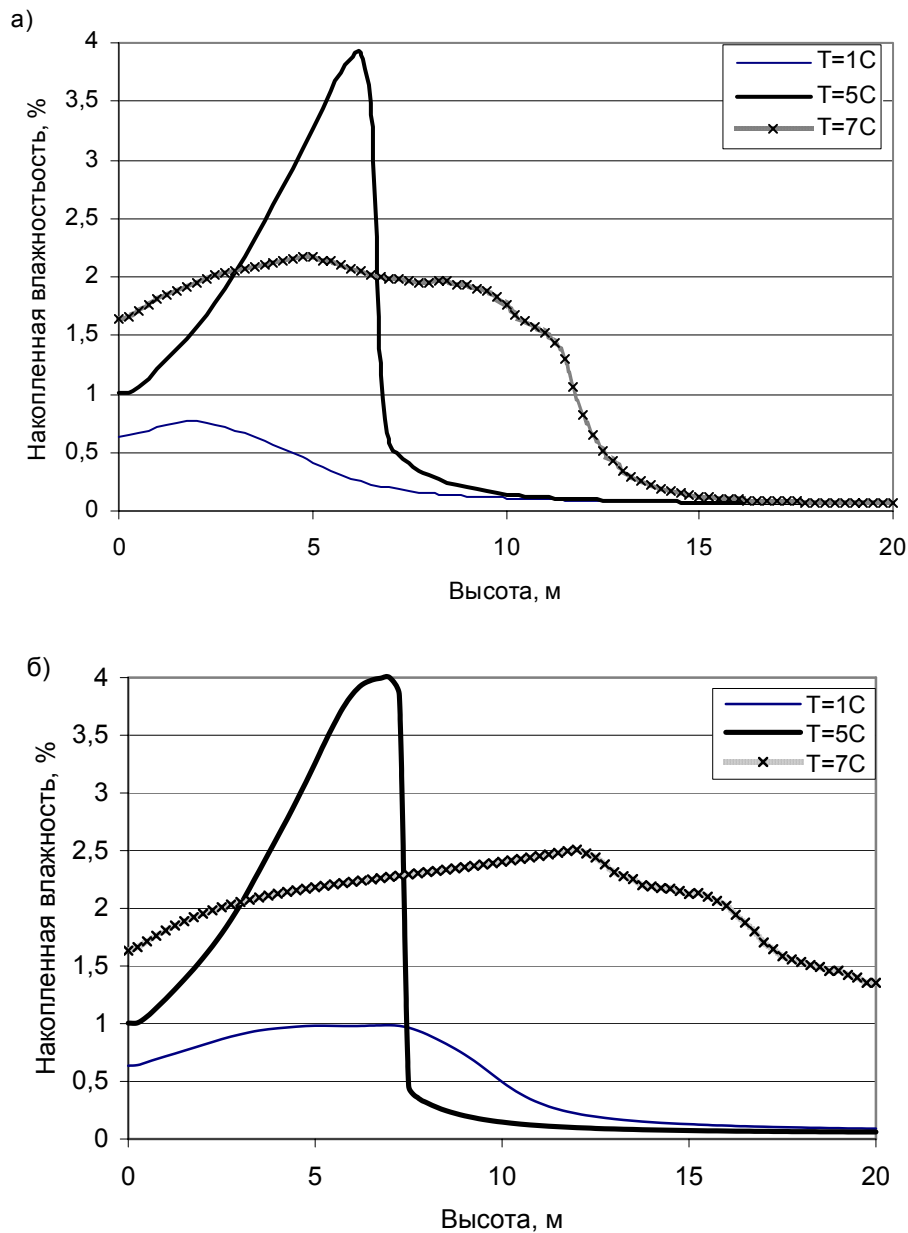


Рис. 4. Распределение накопленной суммарной влаги (вода+лёд) по высоте блока при разных температурах поступающего воздуха через (а) 120 и (б) 240 часов ($T_0 = -4^\circ\text{C}$; $m_0=0,2$; $h = 400 \text{ Па}$; $w = 0,08 \text{ л.е.}$)

мерзлой руды в той или иной степени влияет множество факторов. Для выявления основных закономерностей

этих процессов были проведены численные расчеты при различных исходных данных.

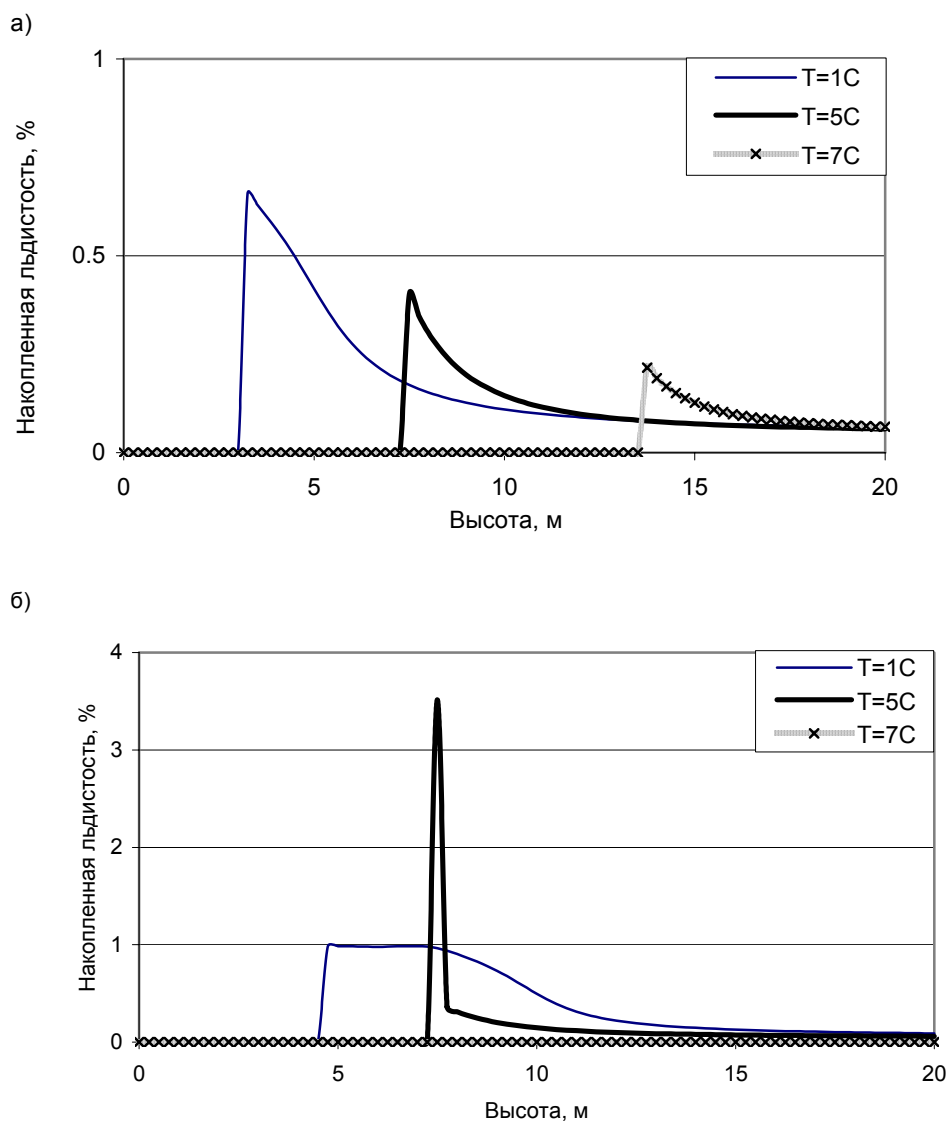


Рис. 5. Распределение накопленной льдистости по высоте блока при разных температурах поступающего воздуха через (а) 120 и (б) 240 часов ($T_0 = -4^\circ\text{C}$; $m_0=0,2$; $h = 400 \text{ Па}$; $w = 0,08 \text{ д.е.}$)

Влияние температуры воздуха. Существенное значение на интенсивность процесса накопления льда в пустотах отбитой руды имеет температура поступающего в блок воздуха. Как показали многочислен-

ные натурные наблюдения, относительная влажность воздуха в выработках рудника близка к 100 %, поэтому расчеты проведены при этой влажности воздуха. На рис. 4 приведены графики распределения накоп-

ленной суммарной влажности (вода+лёд) по высоте блока при разных температурах поступающего воздуха через 120 и 240 часов соответственно.

Из графиков рис. 4 видно, что характер и степень влагонакопления при различных температурах рудничного воздуха неодинаковы. Так при температуре воздуха $\theta=+1$ °С конденсат распределён в нижней части блока и по максимальному значению не превышает 1 % через 120 часов. Через 240 часов максимальное значение конденсата достигает 1 %, влагораспределение имеет сглаженный «горб» и занимает половину высоты блока.

При температуре поступающего воздуха $\theta=+5$ °С влагораспределение в блоке имеет ярко выраженный «горб» на высоте 4-6 м и достигает 4 % через 120 часов. При этом происходит закупорка каналов конденсатом и в дальнейшем характер и степень влагосодержания изменяются незначительно. При температуре поступающего воздуха $\theta=+7$ °С через 120 часов накопление конденсата происходит в нижней половине блока и достигает 2 %, через 240 часов накопленная влага распределена по всей высоте блока достаточно равномерно и имеет максимальное значение 2,5 %.

На рис. 5 приведены графики распределения накопленной льдистости по высоте блока при разных температурах поступающего воздуха через 120 и 240 часов соответственно. Из графиков видно, что при температуре воздуха $\theta=+1$, $+5$ и $+7$ °С в течение 120 ч после начала фильтрации количество накопленного льда составляет менее 1 % (рис. 5, а). При этом зона льдонакопления расположена в разных частях блока. Чем ниже температура воздуха, тем ближе к

началу фильтрационного пути зона льдонакопления.

Как видно из графиков рис. 5 и б, через 240 часов характер и степень льдонакопления меняются. При температуре воздуха $\theta=+1$ °С зона льдонакопления расположена на высоте 4,5-7 м и не превышает 1 %, при температуре воздуха $\theta=+5$ °С этот показатель составляет уже 3,8 % и зона льдонакопления расположена на высоте 7. При температуре воздуха $\theta=+7$ °С льдонакопления не происходит.

Как известно, при повышении температуры воздуха увеличивается его влагосодержание, и следствием этого является повышение интенсивности льдонакопления. Чем выше температура воздуха, тем дальше от начала фильтрационного пути образуется зона максимального льдонакопления. Однако если запасы холода, аккумулированного мерзлыми кусками пород, недостаточны для замерзания конденсата, происходит растепление руды, как это произошло на примере при температуре воздуха $+7$ °С: как видно из рис. 5-а только на достаточной глубине (14 м) образуется зона небольшого содержания льда, которая затем протаивает к моменту времени 240 часов (рис. 5, б).

На рис. 6 приведена динамика скоростей фильтрации при разных температурах воздуха. При температурах воздуха $+3$ и $+5$ °С происходит закупорка каналов, о чем свидетельствует падение скорости фильтрации воздуха до нулевого значения. При температуре воздуха $+5$ °С закупорка каналов инаем происходит через 150 часов, что на 100 часов раньше чем при температуре воздуха $+3$ °С, что объясняется повышенным влагосодержанием воздуха с температурой

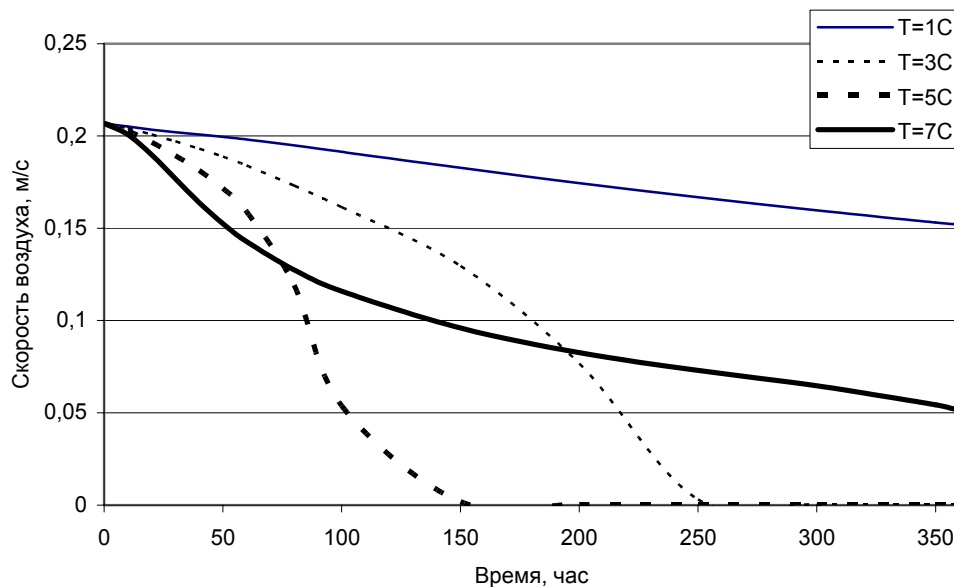


Рис. 6. Динамика скорости фильтрации при различных температурах рудничного воздуха ($T_0 = -4^\circ\text{C}$; $m_0=0,2$; $h = 400 \text{ Па}$)

$+5^\circ\text{C}$ по сравнению с влажностью воздуха с температурой $+3^\circ\text{C}$.

Как видно из графиков рис. 6, при температурах воздуха $+1$ и $+7^\circ\text{C}$ закупорка каналов не происходит. Это объясняется тем, что при температуре воздуха $+1^\circ\text{C}$ интенсивность процессов конденсации низкая и это ведёт только к незначительному уменьшению расхода воздуха через блок отбитой руды, что наблюдается по снижению скорости движения воздуха с $0,21$ до $0,15 \text{ м/с}$ за 360 часов. При температуре воздуха $+7^\circ\text{C}$ происходит растепление отбитой руды, процессы конденсации наиболее интенсивны в первые 100 часов, что наблюдается по резкому снижению скорости воздуха с $0,21$ до $0,13 \text{ м/с}$. В дальнейшем интенсивность конденсации замедляется и скорость воздуха снижается до $0,05 \text{ м/с}$ к 240 часам, закупорки каналов конденсатом не происходит.

Таким образом чем выше температура рудничного воздуха, тем дальше от начала фильтрационного пути образуется зона максимального льдонакопления. Интенсивность льдонакопления в пустотах блока возрастает с увеличением разности температур рудничного воздуха и поверхности кусков мёрзлой руды. Следует отметить, что в отдельных случаях высокая температура воздуха может привести к растеплению горных пород, что исключает их смерзание.

Влияние относительной влажности. На рис. 7 приведены результаты расчетов влаго- и льдонакопления при разных значениях относительной влажности рудничного воздуха, которые подтверждают очевидный вывод о том, что с увеличением относительной влажности воздуха интенсивность влаго- и льдонакопления возрастает и количество накопленного льда увеличивается. Причём, как

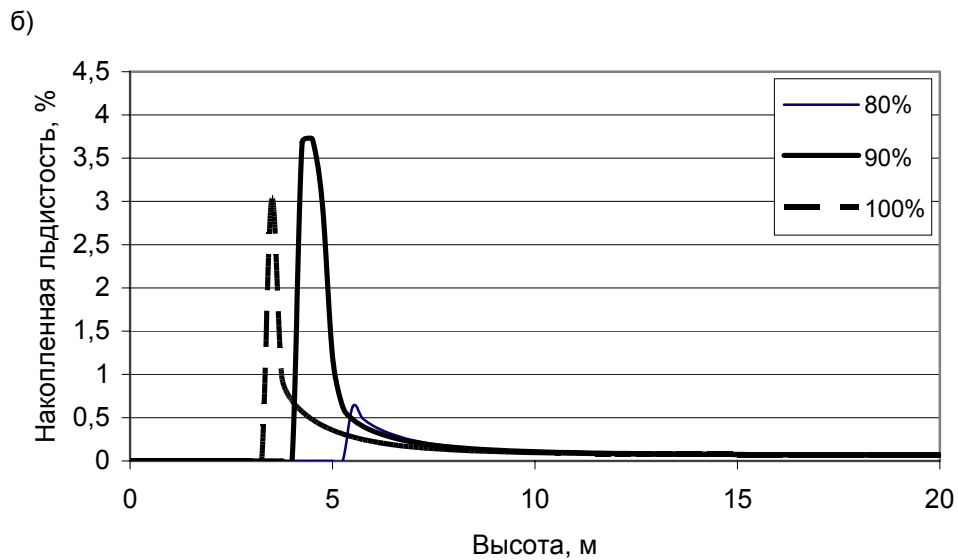
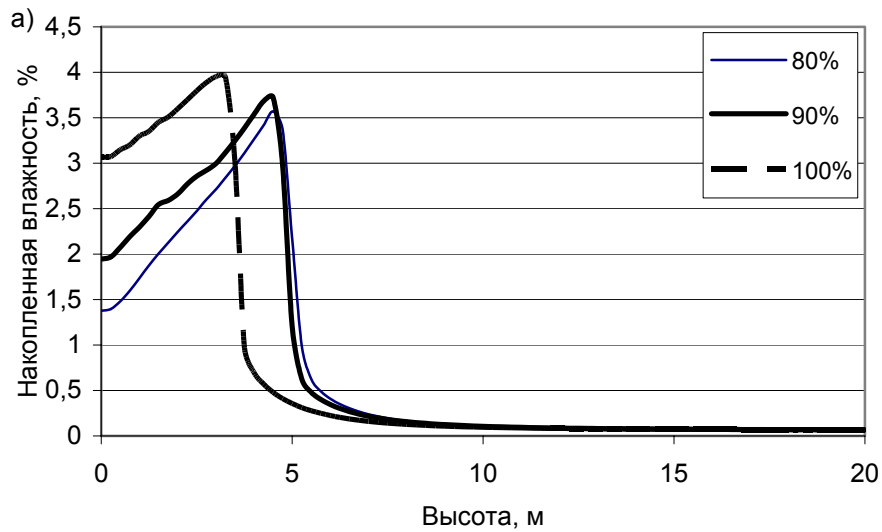


Рис. 7. Распределение накопленной суммарной влажности (а) и льдистости (б) по высоте блока при разных значениях относительной влажности поступающего воздуха через 120 часов ($\theta_0=+5^\circ\text{C}$; $T_0 = -3^\circ\text{C}$; $m_0=0,2$; $h = 400 \text{ Па}$)

видно из графиков, с уменьшением относительной влажности воздуха пик льдонакопления сдвигается вглубь блока.

На рис. 8 приведены графики температуры поверхности кусков отбитой руды через 120 часов по-

сле начала фильтрации воздуха через блок при различных значениях его относительной влажности (влагодержания). При различном влагодержании воздуха зона интенсивного льдообразования расположена на разных высотах блока:

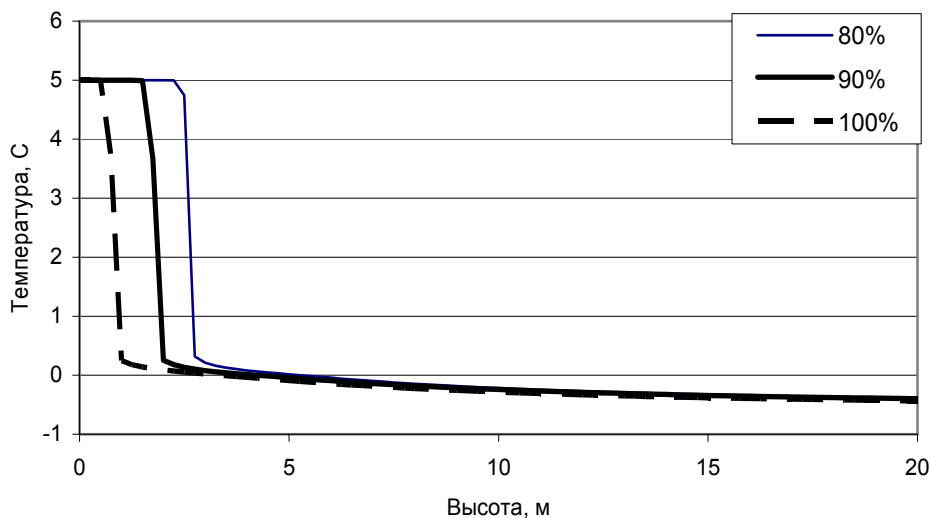


Рис. 8. Температура отбитой руды по высоте блока при разных значениях относительной влажности поступающего воздуха через 120 часов ($\theta_0=+5^\circ\text{C}$; $T_0 = -3^\circ\text{C}$; $m_0=0,2$; $h = 400 \text{ Па}$)

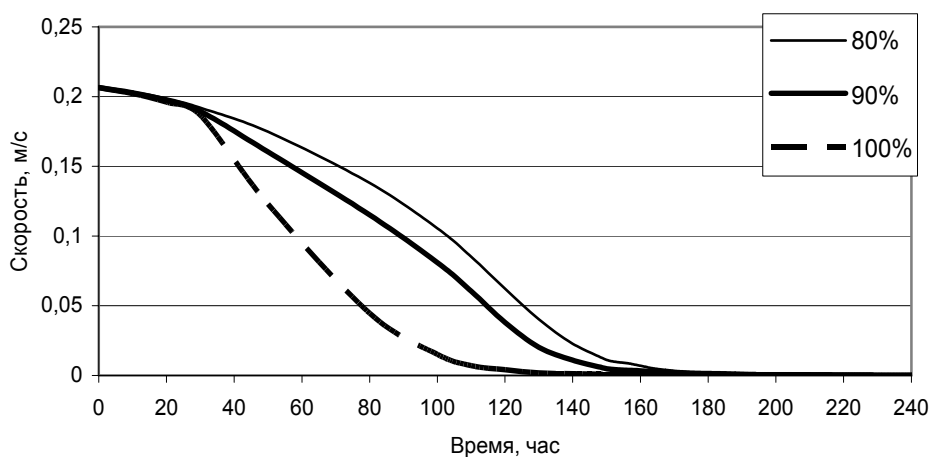


Рис. 9. Изменение скорости движения воздуха при различных значениях его относительной влажности ($\theta_0=+5^\circ\text{C}$; $T_0 = -3^\circ\text{C}$; $m_0=0,2$; $h = 400 \text{ Па}$)

чем выше влагосодержание воздуха, тем ниже по высоте блока расположена зона активного льдонакопления и на меньшую глубину происходит растепление отбитой мёрзлой руды.

На рис. 9 приведены графики изменения скорости движения воз-

духа при различных значениях его относительной влажности (влагосодержания). Как видно из графиков, чем выше влагосодержание воздуха, тем раньше происходит закупорка каналов инеем. Причём видно, что наиболее интенсивно льдообразование происходит при относитель-

ной влажности воздуха 100 %, что наблюдается по резкому снижению скорости воздуха уже через 40 часов.

Таким образом установлены основные закономерности тепло- и массообменных процессов в блоке отбитой руды от параметров воздуха. Показано, что интенсивность льдонакопления в пустотах блока возрастает с увеличением разности

температур рудничного воздуха и поверхности кусков мёрзлой руды, с увеличением относительной влажности рудничного воздуха. Полученные результаты могут служить основой для разработки превентивных мероприятий и технологических решений, предотвращающих вторичное смерзание отбитой горной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каймонов М.В. Влияние процессов тепло- и массопереноса на смерзаемость руды в очистных блоках рудников Севера: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. — Якутск, 2008. — 18 с. **ИДБ**

Коротко об авторах

Каймонов М.В. — научный сотрудник;
 Хохолов Ю.А. — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник;
 Курилко А.С. — доктор технических наук, заведующий лабораторией горной теплофизики.
 Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск
 e-mail: khokholov@igds.ysn.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
КУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ПОТАПОВ Дмитрий Сергеевич	Вычислительное устройство определения влажности железорудных материалов для системы управления процессом сушки аглоруды	05.13.05	к.т.н.