

**Оригинальная статья**

УДК 622.7.017:620.1

DOI 10.57070/2307-4497-2024-1(47)-142-149

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖЕЛЕЗОРУДНОМ КОНЦЕНТРАТЕ,  
ПРОФИЛАКТИРОВАННОМ ИЗВЕСТЬЮ**

© 2024 г. Н. И. Кувшинникова, А. А. Пермяков, М. В. Темлянецв

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Выполнены технолого-минералогические исследования железорудного концентрата мокрой магнитной сепарации до, во время и после профилактирования обожженным известняком. Показано, что вода в составе профилактированного концентрата имеет сложный гетерогенный раствор, в котором присутствуют ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $(\text{OH})^-$ ,  $\text{H}^+$ , а также коллоидно-дисперсные частицы  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_4$  и других минералов. Установлено, что частицы минералов профилактированного концентрата образуют между собой локально ориентированные агрегаты, а вода в процессе профилактирования становится структурированной. Выполненные дифференциально-термические анализы концентрата мокрой магнитной сепарации с добавлением разного количества извести (от 4 до 14 %). Установлено, что испарение воды в концентрате начинается с двадцать четвертой минуты после добавления извести и сопровождается большим количеством тепла. При этом скорость и температура процесса испарения воды зависит от количества извести, вносимой во влажный концентрат. Проведенные исследования позволили установить, что в процессе профилактирования концентрата испарение влаги протекает более интенсивно в первые четыре часа и в зависимости от массы добавляемого обожженного известняка влажность концентрата уменьшается на 0,3 – 1,0 %. Установлено, что дальнейшее уменьшение влаги в концентрате происходит за счет скрытой теплоты кристаллизации и минералообразования. Опытным путем установлено, что полное естественное высыхание концентрата в теплое время года длится примерно 160 – 250 ч (при температуре 20 °С).

**Ключевые слова:** профилактирование, влага, концентрат, обезвоживание, сушка, гидратация, обезвоживание, обожженный известняк, известь, портландит

**Для цитирования:** Кувшинникова Н.И., Пермяков А.А., Темлянецв М.В. Физико-химические процессы в железорудном концентрате, профилактированным известью. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):142–149. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-142-149](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-142-149)

**Original article**

**PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES IN IRON ORE CONCENTRATE,  
PREVENTED BY LIME**

© 2024 N.I. Kuvshinnikova, A.A. Permyakov, M.V. Temlyantsev

Siberian State Industrial University (42, Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

**Abstract.** Technological and mineralogical studies of the iron ore concentrate of wet magnetic separation were performed before, during and after prophylaxis with calcined limestone. It is shown that the water in the composition of the prophylactic concentrate has a complex heterogeneous solution in which  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $(\text{OH})^-$ ,  $\text{H}^+$  ions are present, as well as colloidal dispersed particles of  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_4$  and other minerals. It has been established that the mineral particles of the prophylactic concentrate form locally oriented aggregates among themselves, and the water becomes structured during prophylaxis. Differential thermal analyses of wet magnetic separation concentrate with the addition of different amounts of lime (from 4 to 14 %). It has been established

that the evaporation of water in the concentrate begins from the twenty-fourth minute after the addition of lime and is accompanied by a large amount of heat. At the same time, the speed and temperature of the water evaporation process depends on the amount of lime introduced into the wet concentrate. The conducted studies allowed us to establish that during the prophylaxis of the concentrate, moisture evaporation proceeds more intensively in the first four hours and, depending on the mass of the burnt limestone added, the moisture content of the concentrate decreases by 0.3 – 1.0 %. It was found that a further decrease in moisture in the concentrate occurs due to the latent heat of crystallization and mineral formation. It has been experimentally established that the complete natural drying of the concentrate in the warm season lasts about 160 – 250 hours (at a temperature of 20 °C).

**Keywords:** prophylaxis, moisture, concentrate, dehydration, drying, dehydration, dehydration, burnt limestone, lime, portlandite

**Для цитирования:** Kuvshinnikova N.I., Permyakov A.A., Temlyantsev M.V. Physico-chemical processes in iron ore concentrate, prevented by lime. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):142–149. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-142-149](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-142-149)

### Введение

Рудобогащательные предприятия реализуют технологию получения профилактированного концентрата путем добавления обожженного на агломерационной машине известняка к влажному (около 8,5 %) концентрату мокрой магнитной сепарации (ММС) с целью уменьшения влажности для предотвращения его смерзания при транспортировке [1]. Влага в концентрате является следствием применяемой схемы и негативно сказывается на его конечных свойствах [2]. Она является балластом при транспортировке в морозное время, приводит к смерзанию концентрата в прочный монолит, снижая качество и затрудняя его отгрузку потребителем. Для уменьшения влажности товарного железорудного концентрата большинство предприятий используют барабанные сушилки, однако уменьшение влаги в товарном концентрате мокрой магнитной сепарации возможно также путем введения в его состав обожженного известняка непосредственно на обогащательной фабрике [3 – 15].

Одной из актуальных научно-практических задач является управление физико-химическими, минералообразующими процессами, а также оценка качественных показателей профилактированного концентрата. Для решения этих проблем в Лаборатории экологии и комплексного использования минеральных отходов Сибирского государственного индустриального университета были выполнены комплексные технолого-минералогические исследования проб концентрата до, в процессе и после профилактирования известью с целью выявить закономерность протекания физико-химических процессов при профилактировании концентрата [16].

### Основные результаты

В процессе исследований установлено, что вода во влажном концентрате аномальна в от-

ношении многих физических свойств. С понижением температуры ниже 4 °C удельный объем воды увеличивается, а плотность уменьшается. При превращении воды в лед объем возрастает на 10 %. Теплоемкость воды аномально велика, но при кристаллизации (замерзании) она уменьшается приблизительно в два раза. Скрытая теплота кристаллизации (332,43 кДж/кг) также аномально велика. Эти ее свойства очень полезны при профилактировании концентрата. Теплота парообразования при низкой температуре сравнительно велика (2500 кДж/кг при температуре 0 °C, а при 100 °C она понижается до 2300 кДж/кг). Испаряясь, концентрат интенсивно охлаждается [17 – 19].

Вода во влажном концентрате представляет гетерогенный ионно-коллоидный раствор. Структура воды аномально изменена под действием электромагнитных, но главным образом магнитных полей вокруг и между частицами магнетитового концентрата. В проходящем поляризованном свете нерудные минералы концентрата просвечивают, а рудные непрозрачны (рис. 1).

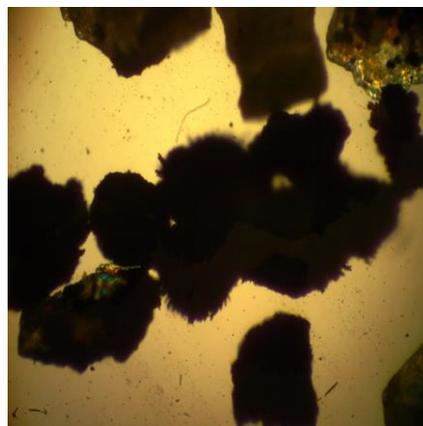


Рис. 1. Обломки магнетита (увеличение  $\times 200$ , проходящий свет)  
Fig. 1. Fragments of magnetite (magnification  $\times 200$ , passing light)

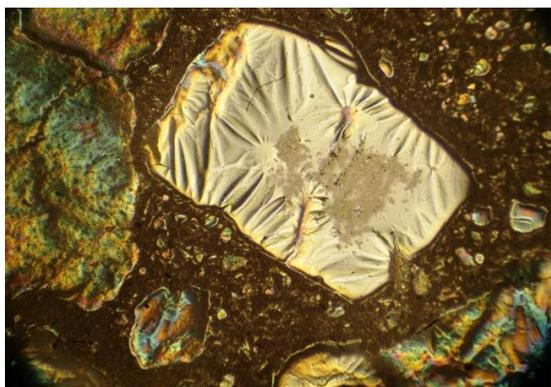


Рис. 2. Электромагнитные поля магнетита (черное) образуют жидкокристаллические агрегаты (светлые слева) (увеличение  $\times 200$ , николи скрещены)

Fig. 2. The electromagnetic fields of magnetite (black) form liquid crystal aggregates (light on the left) (magnification  $\times 200$ , nicoli crossed)

Субперпендикулярно поверхности обломков магнетита налипли тонкие его частицы в соответствии с ориентацией магнитных силовых линий. В концентрате в относительно слабо минерализованной воде не видна ее структура, аномально измененная магнитным полем. Однако всегда следует учитывать существование в концентрате сложных и постоянно локально меняющихся магнитных и электромагнитных полей. Под воздействием магнитных полей частицы магнетита ориентировано прилегают друг к другу, образуя ассиметричные, ветвистые цепочки. Они образуют достаточно крупные электромагнитные поля, положительно влияющие на процесс профилактирования, особенно на начальной стадии.

При взаимодействии с известью вода превращается в концентрированный гетерогенный раствор, в котором присутствуют ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $(\text{OH})^-$ ,  $\text{H}^+$  и другие, а также коллоидно-дисперсные частицы  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  и других минералов. Они несут определенный заряд и создают вокруг себя электромагнитное и микрогравитационное поля определенной конфигурации. Электромагнитные поля ионов и коллоидных частиц, взаимодействуя с магнитными полями макрочастиц в профилактируемом концентрате, образуют достаточно крупные жидкокристаллические поля, видимые в поляризованном свете под микроскопом (рис. 2). Образование этих полей указывает, что частицы концентрата образуют между собой локально ориентированные агрегаты, а вода в процессе профилактирования становится структурированной. Вследствие этого на поверхности рудных обломков образуются эпитаксиальные дендритные нарастания портландита.

Процесс профилактирования концентрата характеризуется кинетикой обезвоживания. Влажность смеси в зависимости от исходной влажности

концентрата и количества добавленного обожженного известняка понижается на 0,3 – 1,0 %. При смешивании концентрата ММС массой  $m_k$  и влажностью  $W_k$  с сухим горчим обожженным известняком массой  $m_{\text{изв}}$ , влажность профилактируемого концентрата  $W_n$  уменьшается:

$$W_n = \frac{W_k m_k}{m_k + m_{\text{изв}}}. \quad (1)$$

При взаимодействии горячего обожженного известняка с влажным концентратом мокрой магнитной сепарации начинается испарение влаги, которое усиливается в результате экзотермической реакции гашения активной извести. Большая часть воды испаряется на начальной стадии профилактирования концентрата. Видимое испарение наблюдается на конвейерном тракте, особенно в моменты каскадного пересыпания с одного конвейера на другой, в бункер или вагон. Источником энергии на испарение воды является горячий (выше 200 °С) обожженный известняк, но главным образом тепло, выделяющееся в процессе экзотермической реакции образования гидроминералов при взаимодействии воды влажного концентрата с компонентами обожженного известняка. Локально температура реакции взаимодействия оксида  $\text{CaO}_{\text{акт}}$  с водой может достигать 460 °С.

Для определения количества испарившейся воды и кинетики испарения в лабораторных условиях были проведены эксперименты. В одинаковые металлические контейнеры одновременно загружали навески влажного концентрата и горячего обожженного известняка массой 4, 6, 8, 10, 12 и 14 % от массы исходного концентрата [20; 21]. Навески обожженного известняка подготавливали заранее и нагревали в печи до температуры 250 °С. После смешивания и периодически в определенное время контейнеры с полученными смесями лабораторно офлюсованного концентрата взвешивали с точностью до 0,01 г и измеряли в них температуру.

Пробы концентрата без извести и профилактированного обожженным известняком массой 6, 8 и 12 % от массы исходного концентрата были исследованы с помощью дифференциально-термического анализа. Он показал, что испарение воды во влажном концентрате начинается при температуре 24 °С и в течение 2 мин медленно нарастает до 70 °С. Начиная с этой температуры, поглощение тепла, а, следовательно, испарение (кипение), заметно возрастает, через минуту эндотермический эффект достигает своего пика при температуре 105 °С. Гравиметрическая кривая показывает, что масса испарившейся воды составляет 6 % от массы исходного

концентрата. Эндотермический эффект испарения воды очень четкий и резкий. Это указывает, что вода во вторичном концентрате мокрой магнитной сепарации содержит очень мало растворенных веществ, то есть является практически чистой, свободной от коллоидно-дисперсных частиц. Испарение воды в концентрате мокрой магнитной сепарации, отмечаемое ДТА потерей массы по гравиметрической кривой, начинается с температуры 32 °С, а заканчивается при 108 °С, равномерно усиливаясь с ростом температуры. Эндотермический эффект, связанный с испарением воды из концентрата, завершается при температуре 180 °С в течение 6 мин.

В профилактированном концентрате процесс испарения длится 15 – 18 мин (рис. 3), почти в 3 раза медленнее, чем в исходном. Это обусловлено тем, что на эндотермический процесс нагревания и испарения воды накладывается экзотермический процесс гидратации извести и образование портландита. По нисходящим линиям ДТА эндотермический процесс в первые 5 – 7 мин преобладает над экзотермическим и достигает своего максимального значения при разных температурах в зависимости от количества извести, добавленной на профилактирование. При добавке 6 % извести эндотермический пик отмечается при температуре 82 °С; при добавке 8 и 12 % извести – при 92 и 94 °С. Поглощаемая энергия на испарение в концентратах (исходный концентрат мокрой магнитной сепарации, К6, К8 и К12) по

данным ДТА пропорционально сокращается – 20,12; –4,21; –3,95 и –3,74  $\mu\text{V}$ .

Правее эндотермического пика пологонаклонная восходящая кривая ДТА показывает, что экзотермический процесс гидратации или образования портландита постоянно преобладает над процессом испарения. Кроме того, начинается экзотермический процесс окисления магнетита, обусловленный повышенной температурой и процессом кислотно-основного взаимодействия оксидов железа и кальция. Термогравиметрические восходящие кривые на протяжении всего начального процесса показывают неуклонное увеличение массы, обусловленное гидратацией оксида СаО, образованием портландита и окислением железа в железорудных минералах. Однако на этих восходящих кривых при температуре  $105 \pm 0,5$  °С отмечается незначительный отрицательный прогиб, уменьшающийся с повышением основности профилактированного концентрата. Именно этот прогиб показывает, что в профилактированном концентрате еще сохраняется свободная гидратная вода, но ее количество обратно пропорционально количеству добавленного обожженного известняка.

Вода с повышением температуры диффундирует активнее, взаимодействуя с оставшимся оксидом СаО. Она образует новые порции портландита, способствуя упорядочению его структуры. Образование портландита и окисление желе-

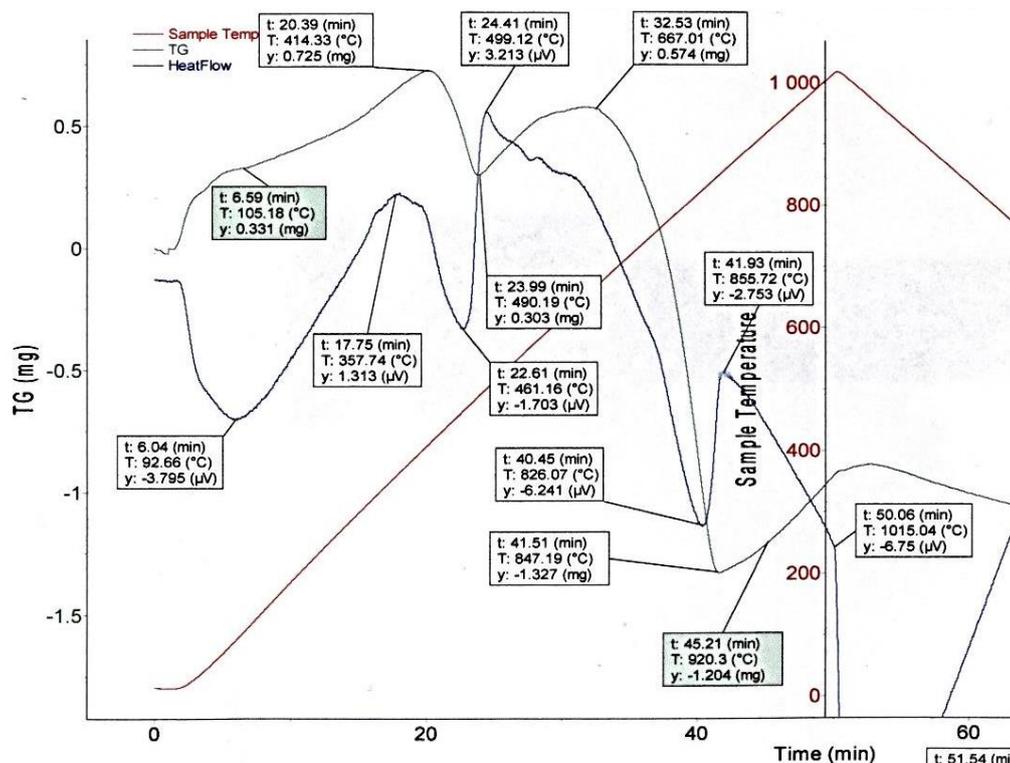


Рис. 3. ДТА концентрата (проба 1306.3), профилактированного 8 % извести  
Fig. 3. DTA of concentrate (sample 1306.3), prevented by 8 % lime

зородных минералов сопровождается выделением большого количества энергии за счет скрытой теплоты кристаллизации, а за счет окисления закисного железа существенно возрастает масса концентрата. Оба эти процесса экзотермические. Четкая закономерность от увеличения основности концентрата не наблюдается.

При дальнейшем повышении температуры начинается дегидратация портландита, начало которой находится в прямой зависимости от основности концентрата. В концентрате  $K_6$  дегидратация начинается при температуре 458,71 °С, а в  $K_{12}$  – при 472,3 °С. Дегидратация сопровождается поглощением большого количества энергии –1,843; –3,016; –3,964  $\mu V$  для концентратов  $K_6$ ,  $K_8$  и  $K_{12}$ . Испарение воды при этом увеличивается с ростом основности концентрата, так как пропорционально основности увеличивается количество портландита. В табл. 1 указана масса выделившейся воды: первое (без скобок) определено по ДТА, однако оно явно занижено, так как на него накладываются значения одновременно действующих экзотермических процессов; в скобках приведено второе значение –

расчетное количество воды, выделившееся при дегидратации портландита.

Далее при повышении температуры следуют несколько экзотермических процессов, связанных с выделением энергии при кристаллизации кальцооксида и дальнейшего окисления железосодержащих минералов. Причем кальцооксид играет ведущую роль. Энергия экзотермических процессов на этой стадии пропорционально увеличивается с ростом основности (+3,534; +4,916; +6,289 для концентратов  $K_6$ ,  $K_8$  и  $K_{12}$ ).

Последняя стадия превращений ДТА соответствует разложению кальцита. С увеличением температуры на этой стадии выявили несколько маленьких эндотермических эффектов, обусловленных разложением гидросиликатов и гидрокарбонатов. Отсутствие количественной закономерности на этом этапе говорит о том, что количество кальцита может быть случайным. Пониженная температура диссоциации кальцита подтверждает, что в момент агломерации и профилактирования возможно образование вторичного или новообразованного кальцита. Высокотемпе-

**ДТА на воздухе профилактированного концентрата**  
**DTA in the air of a prophylactic concentrate**

Процесс	Энергия			Термогравиметрия			Содержание воды, %
	°С	$\mu V$	$\Sigma, \mu V$	°С	mg	$\Sigma, mg$	
<i>Опыт 1306.2, концентрат <math>K_6</math></i>							
Испарение	82,49	–3,32	–3,32	105,44	+0,349	+0,349	–
Окисление, кристаллизация	380,16	+1,832	+5,143	412,05	+0,73	+0,381	–
Дегидратация портландита	458,71	–0,011	–1,843	478,66	+0,546	–0,184	0,31 (0,62)
Окисление, кристаллизация	495,6	+3,523	+3,534	659,25	+0,892	+0,346	–
Диссоциация кальцита	781,25	–2,469	–5,992	822,01	+0,394	–0,498	0,83
<i>Опыт 1306.3, концентрат <math>K_8</math></i>							
Испарение	92,66	–3,795	–3,795	105,18	+0,331	+0,331	–
Окисление, кристаллизация	357,74	+1,313	+5,108	414,33	+0,725	+0,394	–
Дегидратация портландита	461,16	–1,703	–3,016	490,19	+0,303	–0,422	0,7 (1,4)
Окисление, кристаллизация	499,12	+3,213	+4,916	667,01	+0,574	+0,271	–
Диссоциация кальцита	826,07	–6,241	–9,454	847,19	–1,327	–1,901	3,17
<i>1306.5, концентрат <math>K_{12}</math></i>							
Испарение	94	–3,789	–3,789	105,22	+0,253	–	–
Окисление, кристаллизация	394,4	+2,467	+6,249	412,33	+0,475	+0,222	–
Дегидратация портландита	472,3	–1,486	–3,964	485,77	–0,14	–0,489	0,815 (1,63)
Окисление, кристаллизация	499,35	4,803	+6,289	572,18	+0,112	+0,252	–
Диссоциация кальцита	794,58	–1,926	–6,729	822,13	–1,461	–1,573	2,62

ратурный конец кривых ДТА иногда показывает наличие первичного кальцита с температурой диссоциации выше 920 °С. Трудность расшифровки данных ДТА обусловлено тем, что нередко накладывается несколько термических эффектов, иногда даже противоположного знака.

На рис. 4 показана кинетика изменения массы профилированного концентрата за счет испарения и сушки. Масса влажного концентрата мокрой магнитной сепарации принята за 100 %, к ней прибавили массу (в %) добавленного обожженного известняка. Через определенные интервалы времени продукты эксперимента взвешивали и определяли результаты изменения массы профилированного концентрата. Эксперимент проводили при комнатной температуре, за исключением интервала после 3 – 8 ч, когда контейнеры были выставлены на мороз. Полученные данные показывают, что в этот период испарение практически прекратилось.

Под воздействием тепла горячего обожженного известняка и экзотермической реакции гидратации оксида СаО до образования портландита испарение наиболее интенсивно происходит на начальной стадии профилирования (рис. 4). С течением времени испарение замедляется, а через 4 ч от начала оно практически завершается. Далее масса концентрата уменьшается за счет испарения-высыхания. Масса концентрата К<sub>14</sub> за 4 ч уменьшается более чем на 2 %, а концентрат К<sub>4</sub> становится легче только на 1 % и менее. Концентрат К<sub>14</sub> на 1 % становится легче за первые полчаса. В промышленных условиях для определения изменяющейся массы в процессе профилирования можно использовать рис. 4. При профилировании в тепле на процесс испарения накладывается еще процесс сушки, что заметно нивелирует данные. Наиболее контрастно процесс поэтапного испарения проявляется при профилировании концентрата на морозе. При фактическом отсутствии естественной сушки четко видны поврежденные границы испарительного процесса.

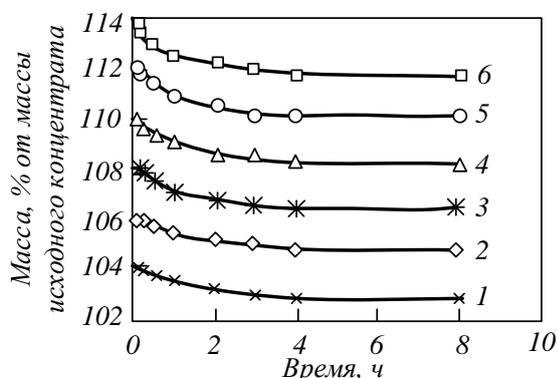


Рис. 4. Кинетика изменения массы профилированного концентрата за счет испарения и сушки:

1 – 6 – 4, 6, 8, 10, 12, 14 % известня

Fig. 4. Kinetics of mass change of the prevented concentrate due to evaporation and drying:

1 – 6 – 4, 6, 8, 10, 12, 14 % lime

## Выводы

Полученные данные хорошо описывают физико-химические процессы, протекающие при профилировании. Процесс профилирования сопровождается выделением большого количества тепла, что в свою очередь приводит к испарению влаги из концентрата после мокрой магнитной сепарации и, как следствие, к сушке концентрата. Испарение воды в процессе профилирования происходит главным образом в первые четыре часа. В последующий период (4 ч) активное испарение прекращается, но изменения в концентрате продолжаются. Продолжается образование портландита, происходит его кристаллизация, сопровождающаяся выделением скрытой теплоты минералообразования и кристаллизации. Поэтому при относительно теплой погоде концентрат в центре насыпной массы вагона оказывается подогретым до 40 °С в момент доставки на предприятие. Полное естественное высыхание концентрата при температуре 20 °С проходит в течение 160 – 250 ч.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берсенов И.С., Клейн В.И., Заршиков П.И., Осокин Н.А., Щеглов В.Н. Производство известня на агломерационной машине МАК-90. *Сталь*. 2013;4:2–5.
2. Прохорович В.А., Заостровский А.И. Повышение влагоемкости железорудных концентратов. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2007;4:58–59.
3. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. *Агломерация*. Москва: Металлургия, 1967:367.
4. Бережной Н.Н., Бульчев В.В., Костин А.И. *Производство железорудных окатышей*. Москва: Недра. 1977:240.
5. Пат. 2425155 РФ. *Способ сушки тонкоизмельченного железорудного концентрата* / С.А. Напольских, Р.А. Гельбинг, А.Г. Сухареv; опубл. 27.07.2011.
6. Пат. 2743951 РФ. *Способ предотвращения смерзания влажного железорудного концентрата* / Р.А. Гельбинг, Н.И. Рябов, Д.В. Рыбакин, А.Л. Мамонов, Д.Н. Волков; опубл. 01.03.2021.
7. Wang S., Guo K., Qi S., Lu L. Effect of frictional grinding on ore characteristics and selectivity of magnetic separation. *Minerals Engineering*. 2018;122:251–257.
8. Sivrikaya O., Arol A.I. Use of Colemanite as an Additive in Iron Ore Pelletizing. *Proceeding of 11<sup>th</sup>. International Mineral Processing Symposium IMPS, Belek*. Antalya. 2008:1121–1127.

9. Hong C., Xing Y., Si Y.X. et al. Lime-Mediated Sewage Sludge and Gas Ash use as Metallurgy Sintering Ingredients. *Advanced Materials Research*. 2013;779-780(9):1623–1628.
10. Gen-Sheng Feng, Sheng-Li Wu, Hong-Liang Han et al. Sintering characteristics of fluxes and their structure optimization. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011;18(6):270–276.
11. Jeong D., Kim K., Min D. W., Choi W. Freezing-Enhanced Dissolution of Iron Oxides: Effects of Inorganic Acid Anions. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(21):12816–12822.
12. Chen H., Yi X., Yan X.S., Wang Z., Guang W.Y., Chang S.Y., Yang L., Xing Q.T., Fan Z., Ana A. Lime-Mediated Sewage Sludge and Gas Ash use as Metallurgy Sintering Ingredients. *Advanced Materials Research*. 2013;779–780(9):1623–1628.  
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.1623>
13. Feng G., Wu S., Han H., Ma L., Jiang W., Liu X. Sintering characteristics of fluxes and their structure optimization. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011;18(6):270–276.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s12613-011-0433-x>
14. Loo C.E., Ellis B.G. Changing bed bulk density and other process conditions during iron ore sintering. *ISIJ International*. 2014;54(1):19–28.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.19>
15. Cores A., Verdeja L.F., Ferreira S., Ruiz-Bustanza I., Mochon S. *Sinterizacion de Minerales de Hierro. Parte 1. Teoria y Practica del proceso*. Dyna. August 2019:152-171.
16. Пермяков А.А., Кувшинникова Н.И., Калиногорский А.Н., Бутов П.Ю., Ганженко И.М., Осокин Н.А. Технологическо-минералогическое исследование кинетики процессов при профилировании концентрата, производимого на Абагурском филиале ОАО «ЕВРАЗРУДА». В кн.: *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество. Труды XVII Всероссийской научно-практической конференции*, 8-11 октября 2013. 2013:12–17. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. EDN: RUPOET.
17. Глинка Н.Л. *Общая химия*. Ленинград: Химия. 1979:688.
18. Эйзенберг Д., Кауцман В. *Структура и свойства воды*. Пер. с англ. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975:280.
19. Уэллс А. Структурная неорганическая химия. Т.2. Перевод с английского. Москва: Мир. 1987:696.
20. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Семенов О.А., Мансурова Н.Р., Кобелев В.А. Оптимизация расхода извести при вводе в аглошихту с целью повышения качества агломерата. *Сталь*. 2010;10:7-9.
21. Христофоров В.П. Оптимизация расхода извести при производстве агломерата в условиях ОАО «Уральская сталь». *Наука и производства Урала*. 2015;11:16–19.

## REFERENCES

1. Bersenev I.S., Klein V.I., Zarshchikov P.I., Osokin N.A., Shcheglov V.N. Production notified to agglomeration machine Mak-90. *Stal'*. 2013;4:2–5. (In Russ.).
2. Prokhorovich V.A., Zaostrovsky A.I. Increasing the moisture capacity of iron ore concentrates. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2007;4:58-59. (In Russ.).
3. Bazilevich S.V., Vegman E.F. *Agglomeration*. Moscow: Metallurgiya, 1967:367. (In Russ.).
4. Bereznoi N.H., Bulychev B.V., Kostin A.I. *Manufacture of iron equipment in the district of Okat*. Moscow: Nedra, 1977:240. (In Russ.).
5. Napol'skikh S.A., Gel'bing R.A., Sukharev A.G. *Method sushki toncommelable Iron Horse-Center*. Pat. 2425155 RF; opubl. 27.07.2011. (In Russ.).
6. Gelbing R.A., Ryabov N.I., Rybakin D.V., Mamonov A.L., Volkov D.N. *A method for preventing freezing of wet iron ore concentrate*. Pat. 2743951 of the RF; publ. 01.03.2021. (In Russ.).
7. Wang S., Guo K., Qi S., Lu L. Effect of frictional grinding on ore characteristics and selectivity of magnetic separation. *Minerals Engineering*. 2018;122:251–257.
8. Sivrikaya O., Arol A.I. Use of Colemanite as an Additive in Iron Ore Pelletizing. Proceeding of 11<sup>th</sup>. *International Mineral Processing Symposium IMPS, Belek*. Antalya. 2008:1121–1127.
9. Hong C., Xing Y., Si Y.X. et al. Lime-Mediated Sewage Sludge and Gas Ash use as Metallurgy Sintering Ingredients. *Advanced Materials Research*. 2013;779-780(9):1623–1628.
10. Gen-Sheng Feng, Sheng-Li Wu, Hong-Liang Han et al. Sintering characteristics of fluxes and their structure optimization. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011;18(6):270–276.
11. Jeong D., Kim K., Min D. W., Choi W. Freezing-Enhanced Dissolution of Iron Oxides: Effects of Inorganic Acid Anions. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(21):12816–12822.
12. Chen H., Yi X., Yan X.S., Wang Z., Guang W.Y., Chang S.Y., Yang L., Xing Q.T., Fan Z., Ana A. Lime-Mediated Sewage Sludge and Gas Ash use as Metallurgy Sintering Ingredients. *Advanced Materials Research*. 2013;779–

- 780(9):1623–1628.  
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.1623>
13. Feng G., Wu S., Han H., Ma L., Jiang W., Liu X. Sintering characteristics of fluxes and their structure optimization. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011;18(6):270–276.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s12613-011-0433-x>
  14. Loo C.E., Ellis B.G. Changing Bed Bulk Density and other Process Conditions during Iron Ore Sintering. *ISIJ International*. 2014;54(1):19–28.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.19>
  15. Cores A., Verdeja L.F., Ferreira S., Ruiz-Bustanza I., Mochon S. *Sinterizacion de Minerales de Hierro. Parte 1. Teoria y Practica del proceso*. Dyna. August 2019:152–171.
  16. Permyakov A.A., Kuvshinnikova N.I., Kalinogorskii A.N., Butov P.Yu., Ganzhenko I.M., Osokin N.A. Technological-mineralogical and investigated Kinetics process in the Prevention of concentrate produced by Abagur branch OAO "EURASRUDA". In: *Metallurgy: techno-Logies, management, innovation, quality. All-Russian Scientific and practical conferences*, 8-11 October 2013. Novokuznetsk: ITs SibGIU. EDN: RUPOET. 2013:12–17. (In Russ.).
  17. Glinka N.L. *General chemistry*. Leningrad: Khimiya, 1979:688.10.
  18. Eisenberg D., Kautzman V. *Structure and properties of water*. Translated from English. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1975:280.
  19. Wells A. *Structural inorganic Chemistry*. Vol. 2. Translated from English. Moscow: Mir. 1987:696.
  20. Filatov S.V., Kurunov I.F., Semenov O.A., Mansurova N.R., Koshelev V.A. Optimization of lime consumption when entering the sinter in order to improve the quality of the sinter. *Steel*. 2010;10:7–9. (In Russ.).
  21. Khristoforov V.P. Optimization of lime consumption in the production of agglomerate in the conditions of JSC Ural Steel. *Science and production of the Urals*. 2015;11:16–19. (In Russ.).

#### Сведения об авторах

**Наталья Игоревна Кувшинникова**, ведущий инженер лаборатории экологии и комплексного использо-

вания минеральных отходов, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** [n.kuvshinnikova@rambler.ru](mailto:n.kuvshinnikova@rambler.ru)

**SPIN-код:** 1117-4629

**Арнольд Аркадьевич Пермяков**, к.г.-м.н., научный руководитель лаборатории экологии и комплексного использования минеральных отходов, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** [permyakovarnold@mail.ru](mailto:permyakovarnold@mail.ru)

**Михаил Викторович Темлянецев**, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** [uchebn\\_otdel@sibsiu.ru](mailto:uchebn_otdel@sibsiu.ru)

**ORCID:** 0000-0001-7985-5666

**SPIN-код:** 6169-5458

#### Information about the authors

**Natal'ya I. Kuvshinnikova**, Leading Engineer of the Laboratory of Ecology and Integrated Use of Mineral Waste, Siberian State Industrial University

**E-mail:** [n.kuvshinnikova@rambler.ru](mailto:n.kuvshinnikova@rambler.ru)

**Arnol'd A. Permyakov**, Cand. of Geologo-Mineralogical Sciences, scientific supervisor of the Laboratory of Ecology and Integrated Use of Mineral Waste, Siberian State Industrial University

**E-mail:** [permyakovarnold@mail.ru](mailto:permyakovarnold@mail.ru)

**Mikhail V. Temlyantsev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

**E-mail:** [uchebn\\_otdel@sibsiu.ru](mailto:uchebn_otdel@sibsiu.ru)

**ORCID:** 0000-0001-7985-5666

**SPIN-код:** 6169-5458

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 20.02.2024

После доработки 27.02.2024

Принята к публикации 01.03.2024

Received 20.02.2024

Revised 27.02.2024

Accepted 01.03.2024