

УДК 621.182.9

## **Влияние параметров промороженного шлака на количество подвижной воды в условиях их статического взаимодействия**

**Т.А. Кулагина\***,  
**Е.П. Хаглеев, П.Е. Хаглеев**  
*Сибирский федеральный университет  
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79<sup>1</sup>*

Received 2.12.2011, received in revised form 9.12.2011, accepted 16.12.2011

---

*Исследуется статическое тепловое взаимодействие водной составляющей пульпы и промороженного шлака как один из аспектов технологии зимнего намыва шлака в дренированный шлакоотвал. Установлено влияние времени контактирования воды с частицами промороженного шлака, размеров частиц шлака, а также начальной температуры шлака на количество воды, сохраняющейся в жидкой фазе и способной двигаться в порах. Применительно к средне- и крупнозернистому шлаку подтверждена справедливость calorиметрического критерия незамерзаемости воды в порах промороженного до минус 25...27 °С шлака, в котором до 80...90 % воды остается в жидкой фазе и сохраняет подвижность. Установлена непригодность шлака с размером частиц менее 2 мм для зимнего намыва в дренированные шлакоотвалы угольных электростанций.*

*Ключевые слова: промороженный шлак, водная составляющая пульпы, температура и размер частиц шлака, calorиметрический критерий, жидкая фаза воды, вода, сохранившая подвижность.*

---

### **Введение**

Российская экономика ориентирована на использование свежих природных материалов. Поэтому на угольных тепловых электростанциях (ТЭС) к золе и шлаку относятся как к бесполезным отходам, накапливаемым в золоотвалах. По оценкам их ёмкость превышает уже 1,5 млрд т. В условиях слабого технического и природоохранного контроля, недостатка средств финансирования данные объекты, состояние которых с каждым годом ухудшается, служат серьёзным источником экологических проблем. В то же время зола и шлак являются ценными видами сырья. Например, в западных странах утилизация золы и шлака приближается к 80-90 %, а на территории Германии вообще отсутствуют постоянно действующие золоотвалы. Таким образом, утилизация золы и шлака решает две задачи: с одной стороны, устраняет неблагоприятное воздействие золоотвалов на окружающую среду, а с другой – позволяет получать дешёвое сырьё, отказываясь от разработки ископаемых месторождений.

---

\* Corresponding author E-mail address: klv\_post@mail.ru

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved

Для повышения степени утилизации золы и шлака необходимо организовать отдельную выдачу золы и шлака потребителям [1]. Избыточное их количество, которое может быть в данный момент принято потребителями, следует складировать: золу в золоотвалах, шлак – в дренированных шлакоотвалах или в комбинированных дренированных золошлакоотвалах [2]. Однако согласно действующим нормативам [2] намыв шлака в дренированные шлакоотвалы или в боковую зону комбинированных дренированных золошлакоотвалов допускается только в теплое время года. Возникает проблема отдельного складирования шлака в холодный период.

Авторами на основании экспериментальных исследований [3] было показано, что намыв шлака системами гидротранспорта в дренированные шлакоотвалы можно производить не только в теплое, но и в холодное время года. Далее был проведен ряд экспериментально-теоретических исследований для обоснования технологии круглогодичного намыва шлака в дренированный шлакоотвал. В настоящей работе рассматривается вопрос, связанный с установлением влияния параметров замороженного шлака на количество воды, сохраняющейся в жидкой фазе и способной двигаться в порах после ее статичного контактирования с частицами шлака.

### 1. Калориметрический критерий незамерзаемости воды в замороженном шлаке

На основании сравнения тепловых потенциалов водной составляющей пульпы и замороженного шлака получен и экспериментально проверен калориметрический (статический) критерий незамерзаемости водной составляющей пульпы [4, 5]:

$$K_{st} = \frac{\Delta Q_w}{\Delta Q_s} = \frac{m \cdot \rho_w \cdot [c_w \cdot (t_0 - t_f) + q_{ph}]}{[\rho_s \cdot c_s \cdot (1 - m) + \rho_i \cdot c_i \cdot m_i] \cdot (t_f - t_s) + \rho_i \cdot m_i \cdot q_{ph}}, \quad (1)$$

где  $\Delta Q_w$ ,  $\Delta Q_s$  – тепловые потенциалы водной составляющей пульпы и замороженного шлака, кДж/м<sup>3</sup>;  $m$ ,  $m_{ins}$ ,  $m_i$  – пористость замороженного шлака, внутренняя пористость частиц шлака и доля, занимаемая первичной влагой, перешедшей в лед;  $\rho_w$ ,  $\rho_i$ ,  $c_w$ ,  $c_i$  – соответственно плотность, кг/м<sup>3</sup>, и теплоемкость, кДж/(кг·°C), воды и льда;  $t_0$ ,  $t_f$ ,  $t_s$  – соответственно начальная температура воды, температура ее замерзания и температура шлака, °C;  $q_{ph}$  – скрытая теплота фазового превращения воды в лед, кДж/кг;  $\rho_s = (1 - m_{ins}) \rho_m$  – кажущаяся плотность частиц шлака, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_m$  – истинная плотность частиц шлака, кг/м<sup>3</sup>.

Согласно критерию незамерзаемости водной составляющей пульпы (1) значение  $K_{st} > 1$  обеспечивается в достаточно большом диапазоне температуры шлака от 0 до минус 60...70 °C. То есть вода, проникшая в поры замороженного шлака, полностью замерзнет, если температура шлака будет ниже минус 60 °C (рис. 1).

Следует иметь в виду, что наиболее низкая температура шлака будет наблюдаться в поверхностных слоях шлака. С глубиной температура шлака возрастает. Поэтому если условие незамерзаемости воды (1) выполняется в верхних слоях шлака, то оно будет выполнено и на более низких отметках шлакоотвала. Так, в слое, где первоначальная температура шлака была на уровне минус 20 °C, мы будем иметь минимум двукратный калориметрический запас (рис. 1).

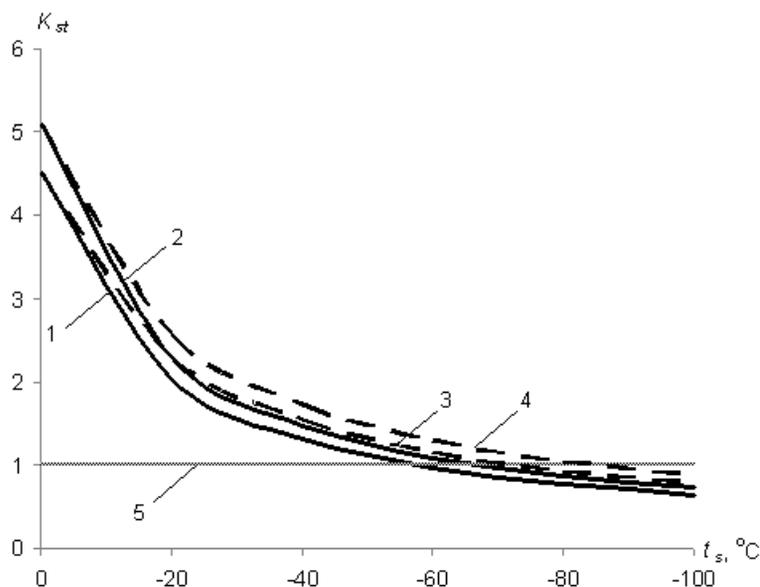


Рис. 1. Зависимость калориметрического критерия от температуры шлака: 1 – вода с температурой 0 °С в шлаке жидкого шлакоудаления; 2 – вода с температурой 20 °С в шлаке жидкого шлакоудаления; 3 – вода с температурой 0 °С в шлаке твёрдого шлакоудаления; 4 – вода с температурой 20 °С в шлаке твёрдого шлакоудаления; 5 – линия замерзания воды

При относительно высоких значениях температуры шлака водная составляющая пульпы образует три различные по физико-механическим свойствам формы:

- лёд, замёрзший на поверхности шлаковых частиц и в поровых каналах между ними;
- воду, оставшуюся в жидкой фазе, но утратившую подвижность, образующую поверхностную плёнку на шлаковых частицах и частицах образовавшегося льда, удерживаемую силами адгезии;
- воду, оставшуюся в жидкой фазе и сохранившую подвижность в свободном поровом пространстве шлака (далее для краткости – подвижную воду).

Чем выше первоначальная температура шлака, тем большее количество воды в порах шлака сохранится в жидкой фазе, и за минусом пленочной связанной воды будем иметь большее количество подвижной воды.

## 2. Экспериментальное исследование влияния параметров замороженного шлака на количество подвижной воды

Для более детального изучения факта статической незамерзаемости водной составляющей пульпы и условий, влияющих на количество подвижной воды в порах замороженного шлака, была проведена серия опытов.

Цель данной серии состояла в установлении влияния на количество подвижной воды:

- продолжительности статического контакта водной составляющей пульпы с замороженным шлаком (1, 10, 30 мин, 1, 3, 6, 12, 24 ч);
- исходной температуры замороженного шлака;
- размеров частиц замороженного шлака.

### 2.1. Методика проведения эксперимента

В эксперименте использовали шлак жидкого шлакоудаления одной из красноярских ТЭЦ, работающей на угле Ирша-Бородинского месторождения. Для испытаний были подготовлены образцы шлака с размерами частиц: 8-12, 6-8, 4-6, 2-4, 1-2, 0-1 мм.

Во всех фракциях были образцы массой 1 кг. Влажность шлака составляла от 2,4 % для крупнозернистых образцов до 9,8 % – для мелкозернистых.

Низший уровень охлаждения шлака  $t_s$  = минус 27 °С выбирали по следующим соображениям. Регионами с наиболее суровыми погодными условиями в Российской Федерации являются Сибирь и районы Крайнего Севера. Слабая освоенность, неразвитая инфраструктура, узкая экономическая ориентация на добычу полезных ископаемых и нерентабельность создания непрофильных производств, которые могли бы быть потребителями золы и шлака, указывают на отсутствие потребности в создании дренируемых шлакоотвалов ТЭС на территориях, относящихся к Крайнему Северу. Среди сибирских городов наименьшая среднемесячная температура наблюдается в январе в г. Чите минус 26,2 °С [6]. В качестве контрольной точки выбирается минимальная среднемесячная, а не минимальная суточная температура в связи с тем, что шлакоотвал представляет собой систему с очень высокой тепловой инерцией.

В серии опытов, определяющих влияние температуры замороженного шлака на количество подвижной воды, использовали ещё две точки: минус 5 и минус 15 °С.

Образцы шлака помещали в морозильную камеру, где они охлаждались до контрольных значений температуры. После промораживания шлак засыпали в термос, предварительно охлажденный до той же температуры, что и образец шлака, с одновременной заливкой пор замороженного шлака водой с температурой 7 °С.

Термос с испытуемой смесью помещался в термостатирующую емкость, заполненную водой со льдом, которая, в свою очередь, помещалась в холодильную камеру с температурой 5...7 °С для сохранения в пределах продолжительности опыта нулевой температуры в термостате<sup>1</sup>.

По истечении заданного времени термос извлекали из термостата. Слив воды из термоса производили через мелкоячеистую сетку в тонкий пластиковый сосуд, охлажденный до 0 °С. В ходе слива измерялась температура вылившейся воды. По окончании слива подвижной воды измерялась её масса, а также температура шлака в термосе с остатками воды в виде льда и воды, утратившей подвижность.

Количество подвижной воды определялось как

$$W_m = w_m / w_0, \quad (2)$$

где  $w_m$  – масса воды, оставшейся в подвижном состоянии после контактирования с частицами замороженного шлака, кг;  $w_0$  – масса воды, первоначально помещенная в поры замороженного шлака, кг.

### 2.2. Анализ результатов эксперимента

Исследование влияния продолжительности статического теплового контакта замороженного шлака и водной составляющей пульпы показали, что температура частиц шлака при вступлении в контакт с водой быстро повышается от минус 25...27 °С до минус 0,3...0,5 °С.

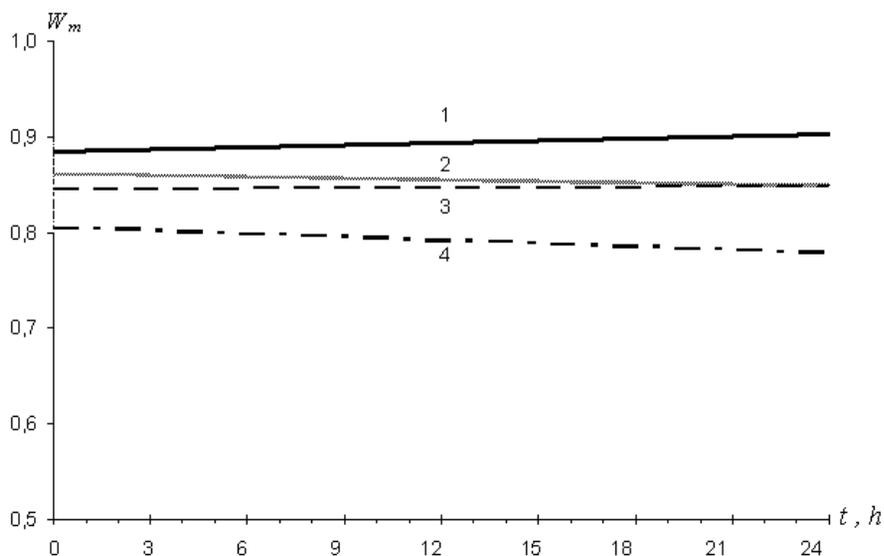


Рис. 2. Зависимость доли воды, оставшейся в подвижном состоянии, от времени контактирования с частицами замороженного шлака: 1 – фракция шлака 8-12 мм; 2 – фракция 6-8 мм; 3 – фракция 4-6 мм; 4 – фракция 2-4 мм

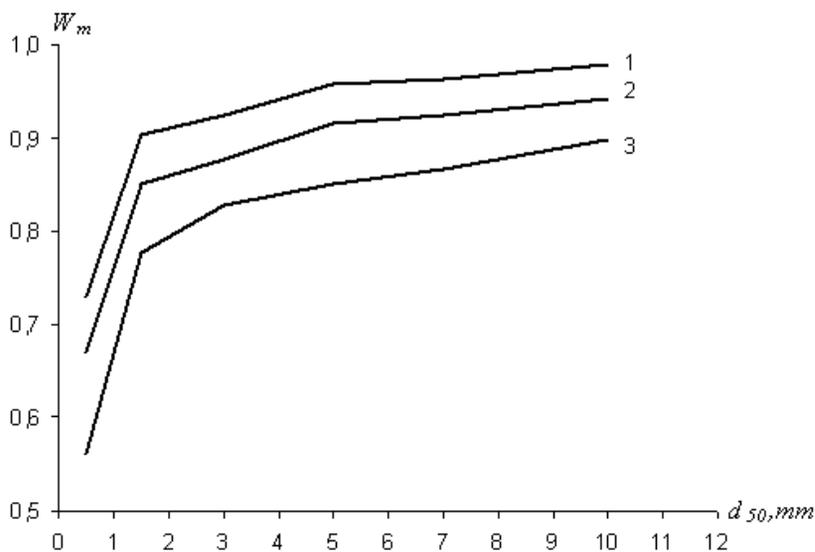


Рис. 3. Зависимость доли воды, оставшейся в подвижном состоянии, от размера шлаковых частиц: 1 – температура шлака минус 5 °С; 2 – температура шлака минус 15 °С; 3 – температура шлака минус 27 °С;  $d_{50}$  – средний размер частиц фракции шлака

Температура воды, в свою очередь, также быстро с момента вступления в контакт снижается от 5...7 до 0,1...0,3 °С (рис. 2). После чего на протяжении всего времени испытания значения температуры шлака и воды в термостате практически не меняются.

Количество подвижной воды в порах  $W_m$  в условиях термостатирования также мало зависит от продолжительности контактирования воды и замороженного шлака.

Заметное влияние на количество подвижной воды оказывает размер частиц шлака рис. 3.

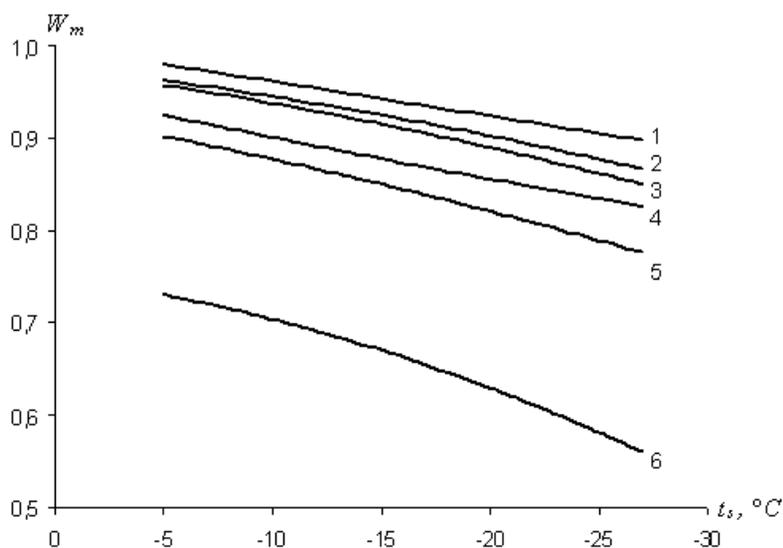


Рис. 4. Зависимость доли воды, оставшейся в подвижном состоянии, от температуры замороженного шлака разных фракций: 1 – фракция шлака 8-12 мм; 2 – фракция 6-8 мм; 3 – фракция 4-6 мм; 4 – фракция 2-4 мм; 5 – фракция 1-2 мм; 6 – фракция 0-1 мм

Наибольшая величина  $W_m$  наблюдалась для крупнозернистого шлака – фракция 8-12 мм, где подвижная вода составила 90 % от количества воды, первоначально залитой в поры замороженного шлака.

Наименьшее количество подвижной воды наблюдалось в образцах с относительно малыми размерами частиц – фракция 1-2 мм, где количество оставшейся в шлаке воды, утратившей подвижность, в виде льда и жидкой плёнки составило 20 % первоначального количества.

Исследования влияния температуры частиц шлака на количество воды, сохранившей подвижность после статического контакта с замороженным шлаком (рис. 4), показало, что с понижением начальной температуры шлака от минус 5 до минус 27 °C, как и следовало ожидать, количество подвижной воды снижается. Даже в образцах крупнозернистого шлака 4-6, 6-8 и 8-12 мм величина  $W_m$  падает на 6...10 %. Причем падение  $W_m$  увеличивается с понижением размеров частиц шлака.

Вторая группа образцов шлака 1-2 и 2-4 мм обладает общим снижением количества подвижной воды от первой группы. Так, в образце шлака с размером частиц 1-2 мм уже при минус 5 °C величина  $W_m$  составляет 90 %, что на 6-9 % меньше, чем для образца шлака с частицами 8-12 мм, а при минус 25 °C количество подвижной воды составляет только 77 %.

Самый низкий процент количества подвижной воды соответствует мелкозернистому шлаку с частицами 0-1 мм. Это можно объяснить весьма развитой поверхностью частиц мелкозернистого шлака, в связи с этим интенсивного переохлаждения воды в начальный момент и превращения ее в лед вокруг этих частиц. Высокая удельная поверхность мелкозернистого шлака приводит и к большому количеству связанной пленочной воды, образующейся на частицах поверх ледяной прослойки.

Вода, сохранившая подвижность после контактирования с частицами мелкозернистого шлака, истекает значительно медленнее, чем из средне- и крупнозернистого шлака. Низкая

проницаемость мелкозернистого шлака наблюдается и в случае положительных значений температуры шлака. В условиях же образования льда и плёнки связанной воды на частицах замороженного шлака тонкие поровые каналы ещё более сужаются, а оставшаяся в расширенных частях поровых каналов вода, сохранившая подвижность, оказывается защемлённой суженными частями каналов.

Результаты на рис. 3, 4 свидетельствуют о невозможности намыва мелкозернистого шлака в дренированный шлакоотвал в холодный период года. Об этом же говорят предварительные опыты, проведенные в лабораторных условиях по промывке колонны с замороженным мелкозернистым шлаком с частицами размером 1-2 мм. Вода первоначально хорошо впитывается в шлак, но затем над поверхностью шлака появляется слой избыточной воды. Это говорит о том, что проницаемость мелкозернистого шлака ниже расхода поступающей с пульпой воды. Образование вокруг частиц шлака льда и поверх его пленочной воды сужает и без того тонкие поры мелкозернистого шлака, что существенно снижает его водопроницаемость. Образование поверхностной воды в шлакоотвале в зимний период недопустимо ввиду возможного образования неуправляемых сосредоточенных потоков воды на поверхности шлакоотвала, образования наледей и т. д.

### Выводы

1. Экспериментально установлено, что калориметрический критерий, указывающий на то, что вода в условиях статического контактирования с частицами замороженного до минус 27 °С шлака не замерзает, справедлив. До 80...90 % воды, находящейся в порах средне- и крупнозернистого замороженного шлака, остается в жидкой фазе и сохраняет подвижность.

2. Время контактирования воды с частицами замороженного шлака в термостатированных условиях практически не влияет на количество воды, сохранившей подвижность.

3. Количество воды, сохранившей подвижность, тем выше, чем крупнее частицы замороженного шлака. В таком шлаке количество образующегося льда в результате переохлаждения воды при вступлении ее в контакт с замороженными частицами шлака не может перекрыть поровые каналы и остановить продвижение воды в шлаке, что было подтверждено в ранее проведенных опытах [1].

4. Чем ниже начальная температура замороженного шлака, тем меньше количество воды, оставшейся в жидкой фазе и сохранившей подвижность.

5. В мелкозернистом замороженном шлаке с размерами частиц менее 1 мм наблюдается наименьшее количество воды, оставшейся в подвижном состоянии. Применительно к этому шлаку калориметрический критерий не выполняется: большое количество воды переохлаждается, превращаясь в лед, к тому же образуется не меньшее количество пленочной воды. Все это говорит о нежелательном присутствии мелкозернистого шлака в составе пульпы при зимнем намыве шлака в дренированный шлакоотвал.

---

<sup>1</sup> Предыдущие опыты показали, что льдоводяная смесь в термостате с температурой 0 °С в холодильной камере сохраняется более суток.

### Список литературы

[1] Состав и свойства золы и шлака ТЭС: справочное пособие/ В. Г. Пантелеев, Э. А. Ларина, В. А. Мелентьев и др.; Под ред. В. А. Мелентьева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1985. 288 с.

[2] Руководство по проектированию дренированных золоотвалов тепловых электрических станций. (П. 64-77). Л.: Энергия, 1977. 67 с.

[3] Хаглеев Е. П., Хаглеев П. Е. О возможности продления срока намыва шлака в дренированный шлакоотвал // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 5-6. С. 96-103.

[4] Хаглеев П. Е. Калориметрический критерий сохранения воды в жидкой фазе в замороженном шлаке // Экологическая безопасность регионов России и риск техногенных аварий и катастроф: XI международная научно-практическая конференция. Пенза, 2011. С. 88-92.

[5] Хаглеев П. Е., Хаглеев Е. П. Экспериментальная оценка теплового баланса водной составляющей пульпы и замороженного шлака в статических условиях // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Материалы международной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2011. С. 240-243.

[6] СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» М.: Госстрой России, 2000. С.21.

## Impact of Freezing Slag Parameters on Mobile Water Quantity with Their Static Interaction

**Tatyana A. Kulagina,  
Eugeny P. Khagleev and Pavel E. Khagleev**  
*Siberian Federal University,  
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

---

*The static thermal interaction of water component of pulp and freezing slag is explored as a one of the point of a winter slag silting technology in a drained slag heap. It was established the impact of the duration of contact, the size of freezing slag fraction and the initial temperature of freezing slag on the liquid mobile water quantity. The correctness of non-freezing of water calorimetric criterion with the pore of freezing to – 27 degrees Celsius coarse- and medium-grained slag was confirmed. In this case about 80...90 % of water remains liquid and mobile. It was ascertained a slag fraction under 2 mm unfitness for winter slag silting in a drained slag heap of coal-fired power plants.*

*Keywords: freezing slag, water component of pulp, temperature and size of slag fraction, calorimetric criterion, liquid water phase, mobile water.*

---