

На правах рукописи



ХАГЛЕЕВ
Павел Евгеньевич

**ОБОСНОВАНИЕ ЗИМНЕГО НАМЫВА ДРЕНИРОВАННЫХ
ШЛАКОТВАЛОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

05.14.01 – энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2012

Работа выполнена на кафедре Теплотехники и гидрогазодинамики
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Кулагина Татьяна Анатольевна

Официальные оппоненты:

Журавлев Валентин Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор;
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», кафедра Инженерной
экологии и безопасности жизнедеятельности, заведующий кафедрой

Иванов Олег Александрович, кандидат технических наук; ЗАО
«Е4-СибКОТЭС», технический директор

Ведущая организация: **Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН**
(г. Новосибирск)

Защита состоится 23 мая 2012 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного
совета ДМ 212.099.07 при «Сибирском федеральном университете» по адресу:
г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Сибирский
федеральный университет».

Автореферат разослан 23 апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чупак Татьяна Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертации обусловлена необходимостью рационального обращения с золошлаковыми отходами тепловых электрических станций (ТЭС) энергетических систем и комплексов с целью их утилизации.

В связи с сокращением запасов и ростом стоимости природного газа и нефти «структура расходуемого топлива на тепловых электростанциях будет изменяться в сторону уменьшения доли газа к 2020 году и увеличения доли угля» («Энергетическая стратегия России на период до 2020 года»). В частности, увеличение потребления угля предполагается на 48 – 70%.

На тепловых электростанциях РФ, работающих на твердом топливе, ежегодный выход золы и шлака достигает 25 млн. т. Только 5-10 % этих материалов подвергается переработке и последующему использованию, а их основная масса складывается в золошлакоотвалах, которые представляют собой сложные, дорогостоящие гидротехнические сооружения и являются постоянным источником загрязнения окружающей среды. В настоящее время золошлакоотвалы многих ТЭС близки к исчерпанию проектной емкости или уже переполнены.

В экономически развитых странах мира степень утилизации золошлаковых материалов достигает 50-100 % и обеспечивается за счет отдельной выдачи золы и шлака потребителям. В России подобная практика по ряду причин не может быть реализована. Так, для отдельного хранения шлака ТЭС разработан специальный класс сооружений – дренированные шлакоотвалы. Однако согласно действующим нормативам намыв таких отвалов допускается только в теплое время года, в то время как в условиях России большая часть золошлаков ТЭС образуется именно в зимнее время.

Таким образом, обоснование возможности круглогодичного намыва дренированных шлакоотвалов является актуальной задачей в решении проблемы утилизации золошлаковых материалов и повышении эффективности работы ТЭС энергетических систем в целом.

Работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники РФ Пр-577 «Энергосберегающие технологии» (критические технологии «Системы жизнеобеспечения и защиты человека» и «Энергосбережение») по открытому плану НИР ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» «Разработка энергоэффективных и экобезопасных технологий».

Объект исследований: дренированные шлакоотвалы ТЭС.

Предмет исследований: условия инфильтрации водной составляющей пульпы в массиве замороженного шлака, тепловой режим дренированного шлакоотвала при круглогодичном намыве.

Цель исследований состоит в научном обосновании зимнего намыва дренированных шлакоотвалов ТЭС в условиях климатических районов России со среднемесячной температурой воздуха в январе до -28°C .

Задачи исследований:

- экспериментально-теоретическое исследование теплового взаимодействия водной составляющей пульпы и частиц замороженного шлака в статических условиях;

- установление принципиальной возможности инфильтрации воды в массиве замороженного шлака и определение условий, обеспечивающих движение лидирующего объема инфильтрационного потока;
- математическое моделирование и численное исследование температурного режима дренированных шлакоотвалов тепловых электростанций.

Научная новизна работы и основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые установлено, что вода с относительно невысокой температурой $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях безнапорной фильтрации свободно протекает через толщу замороженного до температуры $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ шлака.

2. Получены критериальные соотношения, позволяющие определить количество воды, оставшейся в жидком состоянии при статическом взаимодействии с частицами замороженного шлака, и условия продвижения фронта инфильтрационного потока в его порах.

3. Экспериментально определено влияние времени контакта, гранулометрического состава, начальной температуры воды и шлака на количество воды, сохранившей подвижность при ее статическом тепловом взаимодействии с частицами замороженного шлака; экспериментально подтверждена справедливость критериальной оценки условий инфильтрации воды в массиве замороженного шлака; установлен критический диаметр частиц шлака, ниже которого замороженный шлак становится непроницаем для воды.

4. Разработана математическая модель температурного режима дренированного шлакоотвала в виде многофазной, многофронтной задачи Стефана, отличающаяся от известных использованием уравнений сопряжения. Предложен новый алгоритм численного решения данного класса задач.

Практическая значимость работы состоит в разработке программного обеспечения расчета температурного режима дренированных шлакоотвалов ТЭС энергетических систем и комплексов, позволяющие проводить расчёт оптимальных режимов круглогодичного намыва в суровых климатических условиях при проектировании и эксплуатации данных объектов.

Использование результатов работы. Рекомендации по организации зимнего намыва дренированных шлакоотвалов приняты для использования при проектировании и эксплуатации мест хранения золошлаковых отходов филиала «Красноярская ТЭЦ-1» ОАО «Енисейская ТГК».

Научные результаты исследований использованы в учебном процессе (2009-2011) при разработке курса лекций и расчетно-графического задания по дисциплине «Теоретические исследования теплообмена» в Политехническом институте СФУ для студентов и магистров направления 140100 – Теплоэнергетика, а также в научно-исследовательской деятельности Теплоэнергетического факультета ПИ СФУ.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением расчетных данных и результатов экспериментальных исследований и обеспечивается использованием известных научных положений теории теплообмена, фильтрации и мерзлотоведения, адекватностью используемой математической модели.

Личный вклад автора. Автору принадлежат постановка задач исследований, разработка, обоснование и формулировка всех положений, определяющих научную новизну и практическую значимость, постановка экспериментов, анализ и обобщение результатов, формулировка выводов и рекомендаций для

принятия решений. В совместных публикациях автору принадлежит основная часть результатов исследований. Автор выражает признательность научному руководителю, профессору кафедры Инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности Т. А. Кулагиной за методическую помощь при подготовке диссертации к защите.

Апробация работы. Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались на: II Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 1998); IX Всероссийской НПК «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (Красноярск, 2008); Международной конференции «Вычислительная математика, дифференциальные уравнения, информационные технологии» (Улан-Удэ, 2009); V Всероссийской НПК с международным участием «Экологические проблемы промышленных городов» (Саратов, 2011); XI Международной НПК «Экологическая безопасность регионов России и риск от техногенных аварий и катастроф» (Пенза, 2011); Международной НПК «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2011); Международной НПК «Современные материалы, техника и технологии» (Курск, 2011).

По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них: две статьи в периодических изданиях из перечня ВАК, один патент РФ на изобретение одна статья в сборнике научных трудов, девять статей – в трудах Всесоюзных, Всероссийских и Международных научно-технических конференциях.

Объем и структура работы. Материалы диссертации изложены на 180 страницах основного текста, включающих 52 рисунка и 6 таблиц. Работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов, списка использованных источников из 199 наименования и приложения на 20 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определяющая цель и задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первом разделе дан анализ современного состояния вопросов утилизации и складирования золошлаковых отходов. Увеличение объемов сжигания углей на ТЭС приводит к прогрессирующему увеличению объемов золошлакоотвалов и изъятию значительных площадей полезных земель, при этом наносится серьезный ущерб окружающей среде. К настоящему времени в нашей стране в золоотвалах накоплено до 1,5 млрд. т золошлаков, а площади, занимаемые этими отвалами, достигают 22 тыс. га. Одним из способов повышения объемов утилизации золы и шлака является отдельная их выдача потребителям. За рубежом именно отдельной выдачей золы и шлака решают проблему их полезного использования. Так в США, Великобритании, Польше, Китае утилизируют до 50-70 % годового выхода золы и шлака, а в Германии и Дании – 100 %.

В 1965 г. сотрудниками Теплоэлектропроекта Г. С. Агеевым и др. была предложена технология складирования золошлаковых материалов в дренированных золошлакоотвалах, затем совместно с ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (В. А. Мелентьев, В. Г. Пантелеев и др.) разработан нормативный документ по проектированию дренированных золошлакоотвалов типов: I-A, I-B, I-B («Руководство по проектированию дренированных золоотвалов тепловых электрических

станций». (П. 64–77). – Л.: Энергия, 1977. – 67 с). Первый из них, тип I-A, может быть использован для отдельного складирования шлака. Однако намыв дренированных шлакоотвалов при этом рекомендовано осуществлять лишь в теплое время года.

Применительно к районам с суровым климатом накоплен достаточно богатый опыт зимнего намыва гидротехнических сооружений, изложенный в работах М. Н. Захарова, Т. И. Пеняскина, Ю. А. Попова, Д. В. Рощупкина, А. А. Церцената и др. Зимний намыв ответственных гидротехнических сооружений проводят по блочной схеме в условиях непрерывности намыва и максимального покрытия всей карты потоком пульпы со сбором водной составляющей пульпы в пруд-отстойник. Однако технология, применяемая в гидромеханизации, не может быть принята для зимнего намыва дренированного шлакоотвала, т.к. намыв шлака связан с полной инфильтрацией водной составляющей пульпы в пределах длины пути инфильтрации в дренажную сеть основания отвала.

Процесс намыва хвостохранилищ, золоотвалов и др. намывных накопителей отходов неотъемлемо связан с фильтрацией жидкостей в пористых средах. Впервые обоснование водопроницаемости мерзлых почв представил в своей работе А. А. Шалабанов (1903). В последующем это направление в теории фильтрации было продолжено в работах Н. А. Качинского (1927), Л. Н. Степанова (1957), Е. Н. Цыкина (1956), Н. А. Моисеенко (1957), А. А. Ананяна (1972) и др. авторов. Значительный вклад в изучение фильтрации воды в вечномерзлых грунтах сделан Б. А. Оловиным (Фильтрационная проницаемость вечномерзлых грунтов – Новосибирск: «Наука». 1993. – 257 с). Кроме указанных выше работ известна работа Е. П. Хаглеева, в которой получен положительный результат по нагнетанию вязкопластичных растворов на водной основе в охлажденные песчаные и песчано-гравелистые грунты, имеющих низкую отрицательную температуру – (12...20) °С, без предварительного их отепления (1977). Главный вывод, который можно сделать по результатам обзора представленных работ по вопросам фильтрации воды и водных растворов в горных породах, имеющих отрицательную температуру, – это то, что мерзлые (промерзшие) несвязные грунты водопроницаемы как в условиях напорной, так и безнапорной фильтрации воды. Однако для обоснования зимнего намыва дренированных шлакоотвалов необходимо доказать, что шлак при отрицательных значениях температуры не только водопроницаем, но и сохраняет при этом высокую проницаемость для пропуска большого расхода водной составляющей пульпы в условиях безнапорной фильтрации. Кроме того на основании решения задачи многолетнего температурного режима необходимо обеспечить такие условия возведения и эксплуатации дренированного шлакоотвала, при которых подвижная граница промерзания-оттаивания не проникает в дренаж.

Результаты анализа литературных источников подтверждают актуальность работы и возможность решения проблемы круглогодичного намыва дренированного шлакоотвала, а также поэтапного решения экспериментальными и теоретическими методами других, сформулированных в диссертации, задач.

Во втором разделе изучается статическая незамерзаемость водной составляющей пульпы в промерзшем шлаке как один из аспектов технологии зимнего намыва дренированного шлакоотвала.

На основании сравнения тепловых потенциалов водной составляющей пульпы и замороженного шлака получен и экспериментально проверен критерий, устанавливающий количество незамерзшей воды в условиях статического взаимодействия воды и частиц замороженного шлака:

$$Q_B = m_B \rho_B [c_B (t_B - t_\phi) + q_\phi]; \quad Q_{ш} = (1 - m) \rho_{ш} c_{ш} (t_\phi - t_{ш});$$

$$Q_L = m_L \rho_L [c_L (t_\phi - t_{ш}) + q_\phi] \quad (1)$$

$$K_{н.в} = (Q_B - Q_{ш} - Q_L) / Q_B > 0, \quad (2)$$

где $Q_B, Q_{ш}, Q_L$ – тепловые потенциалы соответственно воды, замороженного шлака и теплоты таяния льда, содержащегося в шлаке, Дж/м³; $K_{н.в}$ – критерий количества незамерзшей воды; $m, m_B = m - m_L, m_L$ – соответственно пористость замороженного шлака и объемные доли, занимаемые в нем водой и первичной влагой, находящейся в шлаке в виде льда; ρ_B, ρ_L, c_B, c_L – соответственно плотность, кг/м³, и теплоемкость, кДж/(кг·К), воды и льда; $t_B, t_\phi, t_{ш}$ – начальная температура воды, температура заморозки воды и начальная температура шлака, °С; q_ϕ – скрытая теплота фазового превращения воды в лед, кДж/кг; $\rho_{ш} = (1 - m_{вн}) \rho_M, \rho_M$ – соответственно кажущаяся и истинная плотность частиц шлака, кг/м³; $m_{вн}$ – внутренняя пористость частиц шлака.

Тепловой потенциал воды настолько велик, что даже при неблагоприятных условиях, когда начальная температура воды равна 0°С, а шлак имеет весьма плотную упаковку $m = 0,35$, последняя ее капля согласно критерию $K_{н.в}$ (2) превратится в лед только при температуре шлака близкой –90°С (рисунок 1). Справедливость критерия $K_{н.в}$ проверена серией опытов при статическом взаимодействии воды с температурой 7°С с частицами замороженного шлака с температурой –28°С и пористостью порядка 0,45.

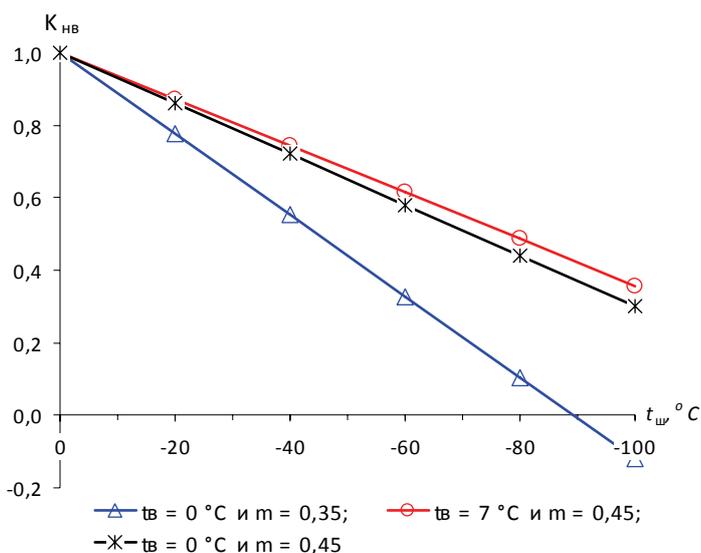


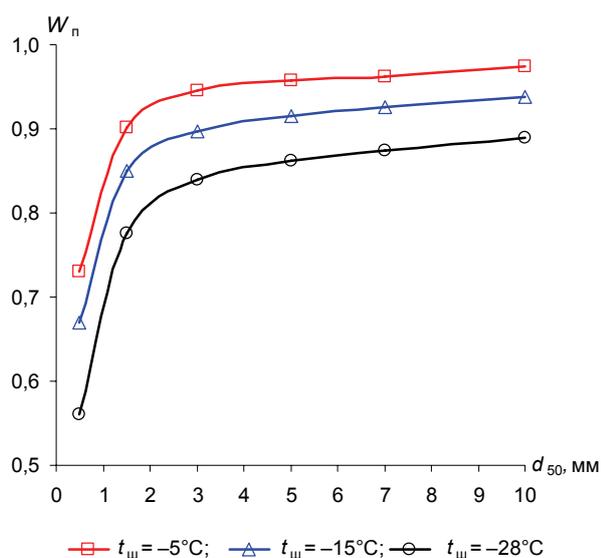
Рисунок 1 – Зависимость критерия $K_{н.в}$ от температуры замороженного шлака, его пористости $m = 0,35$ и $0,45$ с начальной влажностью $w = 0,03$ (льדיстостью 0,033) и температуры воды $t_B = 0$ и 7°C

Установлено, что время контакта воды с частицами замороженного шлака практически не влияет на количество воды сохранившей подвижность

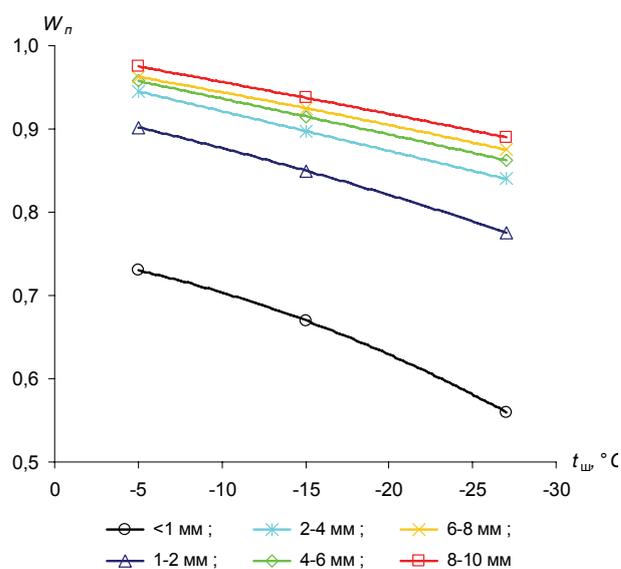
$W_{\text{п}} = w_{\text{п}} / w_0$, где $w_{\text{п}}$ – масса воды сохранившей подвижность, w_0 – первоначальная масса воды в порах.

Заметное влияние на величину $W_{\text{п}}$ оказывает размер частиц шлака (рисунок 2, а). Наибольшая величина $W_{\text{п}}$ наблюдалась для крупнозернистого шлака 8...12 мм, где вода в жидкой фазе составляет порядка 90% от первоначального количества воды, залитой в поры замороженного шлака. Наименьшее значение $W_{\text{п}} = 55\%$ наблюдалось в образцах с относительно малыми размерами частиц – менее 1 мм.

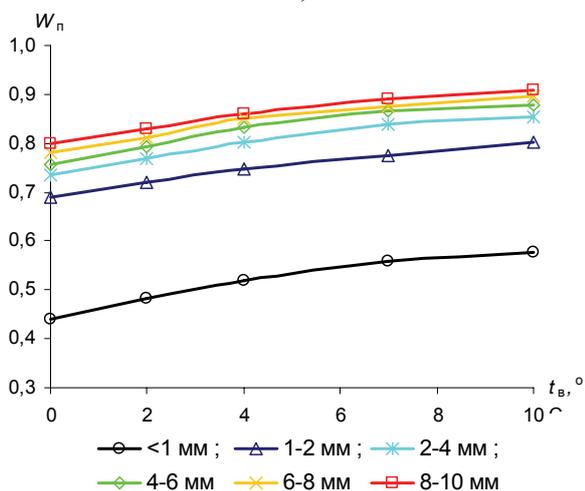
Для более полного представления о величине $W_{\text{п}}$ помимо представленных выше закономерностей была установлена ее зависимость от начальной температуры замороженного шлака и начальной температуры воды (рисунок 2, б, в).



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Зависимость количества воды, остающейся в подвижном состоянии, от
а) размеров частиц шлака;
б) начальной температуры шлака;
в) начальной температуры воды

Эксперимент показал, что с понижением температуры замороженного шлака от -5 до -28°C величина $W_{\text{п}}$ снижается (рисунок 2, б). Даже в образцах крупнозернистого шлака 4–6, 6–8 и 8–12 мм величина $W_{\text{п}}$ падает на 9–10 %, причем падение $W_{\text{п}}$ увеличивается с уменьшением размеров частиц шлака – 17% для фракции 0-1 мм. Лед и пленочная вода в мелкозернистом шлаке приводят к заметному уменьшению диаметра поровых каналов, в особенности в

местах их сужений, и вследствие этого существенному снижению $W_{\text{п}}$ (рисунок 2, б). Подвижная вода оказывается защемленной в порах между этими сужениями, что свидетельствует о нежелательном присутствии мелкозернистого шлака в составе пульпы.

Менее выраженное влияние на количество воды остающейся в подвижном состоянии оказывает её начальная температура (рисунок 2, в). В диапазоне от 0 до 10°C прирост $W_{\text{п}}$ составляет от 11 до 14% в зависимости от фракции шлака.

В третьем разделе рассматривается вопрос о принципиальной возможности движения водной составляющей пульпы в замороженном шлаке в условиях безнапорной фильтрации.

Для установления этого факта была проведена серия опытов на экспериментальной установке, представляющей собой колонну прямоугольной призматической формы сечением 150×200 мм и высотой 2,0 м. Эксперимент проводился со шлаком, отобранным из под котлов со слоевым сжиганием березовского бурого угля. После подготовки образцов влажного шлака заданного гранулометрического состава производилась их загрузка в колонну, имитирующую толщину намытого шлака, с установкой датчиков температуры ДТС 024-50М.В3.20/2 по высоте слоя в трех расчетных створах: $0,25 \cdot h$; $0,5 \cdot h$ и $0,75 \cdot h$, где h – толщина замороженного шлака. Затем колонна с влажным шлаком промораживалась до необходимой температуры. Во время проливки колонны водой производились замеры температуры, времени и скорости прохождения через толщину замороженного шлака фильтрующейся воды.

Проведено двенадцать опытов при трех значениях температуры: $t_{\text{ш}} = -8$; -12 и -17 °C для шлака с размером частиц 2...10 мм (таблица 1). Расход проливаемой воды составил 0,5 и 2,0 л/с. Толщина слоя замороженного шлака принималась равной 1,0; 1,5 и 2,0 м. Начальная температура воды во всех опытах составляла 5°C. Каждый опыт проводился повторно.

Таблица 1 – Результаты эксперимента по инфильтрации воды через слой замороженного шлака¹

Номер эксперимента	Температура шлака $t_{\text{ш}}$, °C	Глубина промерзания h , м	Расход воды Q_0^M , л/с	Температура воды в расчетных створах, °C			Время протекания воды τ , с	Средняя скорость w , м/с
				$t_{0,25}$	$t_{0,5}$	$t_{0,75}$		
1	-8,0	1,0	0,5	0,4	0,3	0,3	18,0	0,06
			2,0	0,4	0,3	0,3	1,5	0,67
2	-17,0	1,5	0,5	0,7	0,4	0,3	15,0	0,10
			2,0	0,8	0,4	0,3	1,6	0,94
3	-12,0	2,0	0,5	0,9	0,5	0,3	30,0	0,07
			2,0	1,0	0,6	0,3	2,8	0,71

¹ В таблице приведены усредненные значения

Полученные результаты показывают, что замороженный шлак даже с относительно низкой отрицательной температурой проницаем для потока воды в условиях безнапорной фильтрации. Кроме того, эксперимент был проведен с практически двойным запасом по дефициту теплоты замороженного шлака при одинаковой температуре по всей глубине слоя (таблица 1). В реальных же условиях температура слоя с глубиной повышается.

Способность воды двигаться в порах замороженного шлака обусловлена следующими факторами: во-первых, относительно чистыми порами замороженного шлака, не заполненными льдом – остаточная влажность шлака перед замораживанием не превышает 4%; во-вторых, вода обладает значительной по величине скрытой теплотой фазового превращения $q_{\text{ф}} = 335,2$ кДж/кг, а также высокой теплоемкостью $c_{\text{в}} = 4,19$ кДж/(кг·К), существенно превышающей теплоемкость шлака $c_{\text{ш}} = 0,75$ кДж/(кг·К). Однако оба фактора являются только *необходимыми условиями*, обеспечивающими движение воды в замороженном шлаке. *Достаточным условием* является третий фактор, заключающийся в процессе обновления частиц воды, находящихся в так называемом лидирующем объеме фильтрующегося потока воды, на тыловые частицы, имеющие более высокий тепловой потенциал по сравнению с первыми (рисунок 3).

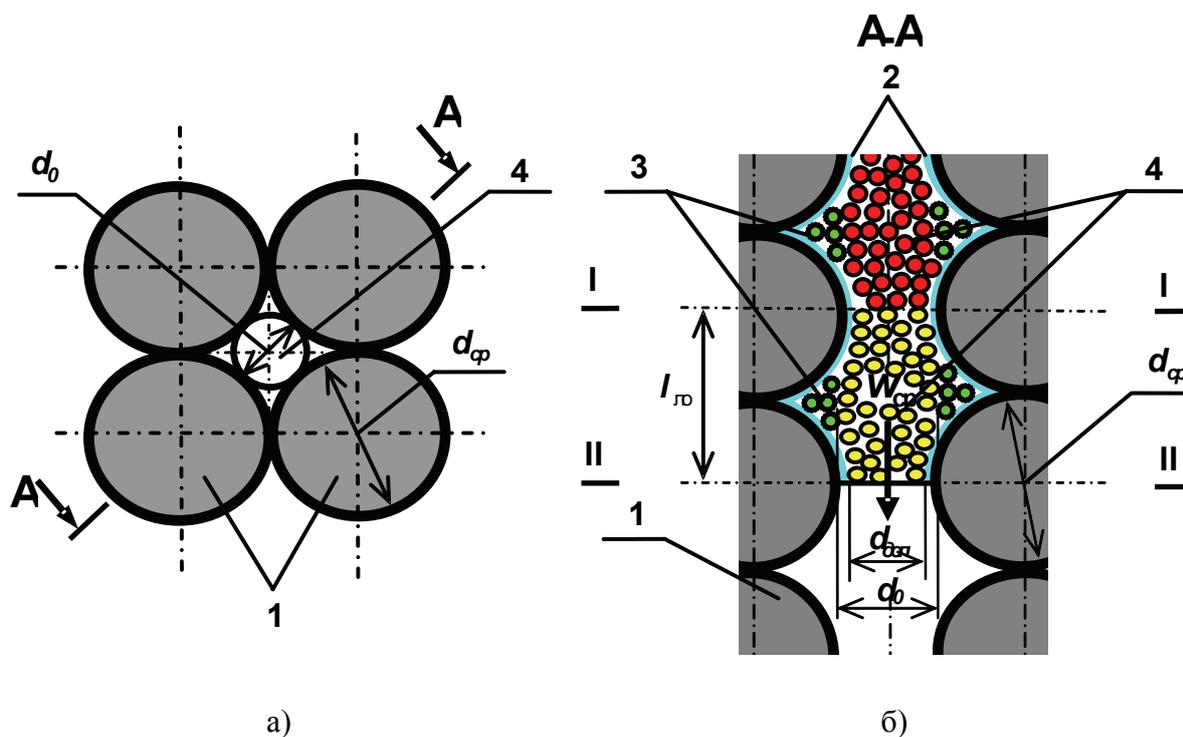


Рисунок 3 – Модель четочного канала в однородном массиве шлака: а) вид сверху; б) разрез по А-А; 1 – частицы шлака; 2 – слой льда; 3 – застойные зоны порового канала; 4 – динамический канал. Условные обозначения: ● – частицы воды, находящиеся в лидирующем объеме; ● – частицы воды застойных зон; ● – частицы находящиеся в тыловом объеме

Наибольшее охлаждающее воздействие вода испытывает в процессе ее первоначального прохождения через слой замороженного шлака. При своем движении вперед лидирующий объем постоянно вступает в тепловой контакт со все новыми стенками поровых каналов, имеющих первоначально отрицательную температуру $t_{\text{ш}}$, ниже температуры замерзания воды $t_{\text{ф}}$. При этом на смену частицам воды в пределах сечений I-II поступают тыловые частицы, обладающие более высоким тепловым потенциалом.

Вытесненные из динамического канала частицы воды заполняют застойные зоны уже нового расширения и частично намерзают на его стенках. А динамический канал 4 заполняют тыловые частицы и т. д. В результате такого материального обмена лидирующий объем сохраняет способность двигаться в поровых каналах промороженного шлака.

Приняв за основу приближенное решение задачи промерзания цилиндра (первый метод Л. С. Лейбензона) время намерзания некоторого критического слоя льда в канале, который может привести к значительному снижению инфильтрации воды, можно представить в виде:

$$Fo_{кр} = 0,5 \cdot Ko \left[R_{кр}^2 \ln R_{кр} + 0,5(1 - R_{кр}^2) \right] \quad (3)$$

где $Fo_{кр} = a_b \tau_{кр} / r_0^2$ – число Фурье; $Ko = q_{\phi} \rho_b \bar{a}_b / [c_l \rho_l (t_{\phi} - t_{ш})]$ – критерий Косовича; $R_{кр} = r_{кр} / r_0$ – относительный критический радиус канала; $\rho_b, a_b, \bar{a}_b = a_b / a_l$ – соответственно плотность, кг/м³, коэффициент температуропроводности воды абсолютный, м²/с, и относительный; ρ_l, c_l, a_l – соответственно плотность, кг/м³, теплоемкость, кДж/(кг·К), и коэффициент температуропроводности льда м²/с; $r_0, r_{кр}$ – радиус первоначального порового канала и после намерзания на его стенках критического слоя льда, соответственно, м.

Время полного обновления частиц лидирующего объема в динамическом канале тыловыми частицами согласно закону сплошности потока жидкости в динамическом канале составит

$$Fo_{п.з} = m\Gamma / (Pe \cdot R_{доп}^2), \quad (4)$$

где $Fo_{п.з} = a_b \tau_{п.з} / (r_0^2)$ – число Фурье, характеризующее время полной замены частиц лидирующего объема; $\Gamma = d_{ср} / r_0$ – геометрический критерий; $Pe = w_{\phi} r_0 / a_b$ – число Пекле; $R_{доп} = r_{доп} / r_0$ – относительный допустимый радиус канала; $d_{ср}$ – средневзвешенный диаметр частиц шлака, м; w_{ϕ} – скорость безнапорной фильтрации воды в шлаке, м/с; $r_{доп}$ – радиус порового канала после намерзания слоя льда, допустимого из условия сохранения проницаемости шлака, м.

Таким образом, условие, при котором движение лидирующего объема инфильтрационного потока воды в промороженном шлаке будет сохраняться, можно записать в следующем виде:

$$K_{дин} = Fo_{кр} / Fo_{п.з} \geq 1. \quad (5)$$

При выполнении условия инфильтрации (5) тыловые частицы воды будут замещать частицы лидирующего объема быстрее, чем успеет намерзнуть критический слой льда (рисунок 4).

Расчеты показывают, что при температуре шлака $t_{ш} = - (17 - 26)^\circ\text{C}$, соответствующей среднемесячной температуре января месяца городов Сибири, критерий инфильтрации – $K_{дин}$ для крупнозернистых шлаков со средним размером частиц $d_{ср} \geq 3$ мм всюду многократно выше единицы (рисунок 4). То есть ин-

фильтрация воды происходит при $R_{\text{доп}} \geq R_{\text{кр}} = 0,89$ и проницаемость шлака не меньше первоначальной – $k_{\beta} \geq k_0$.

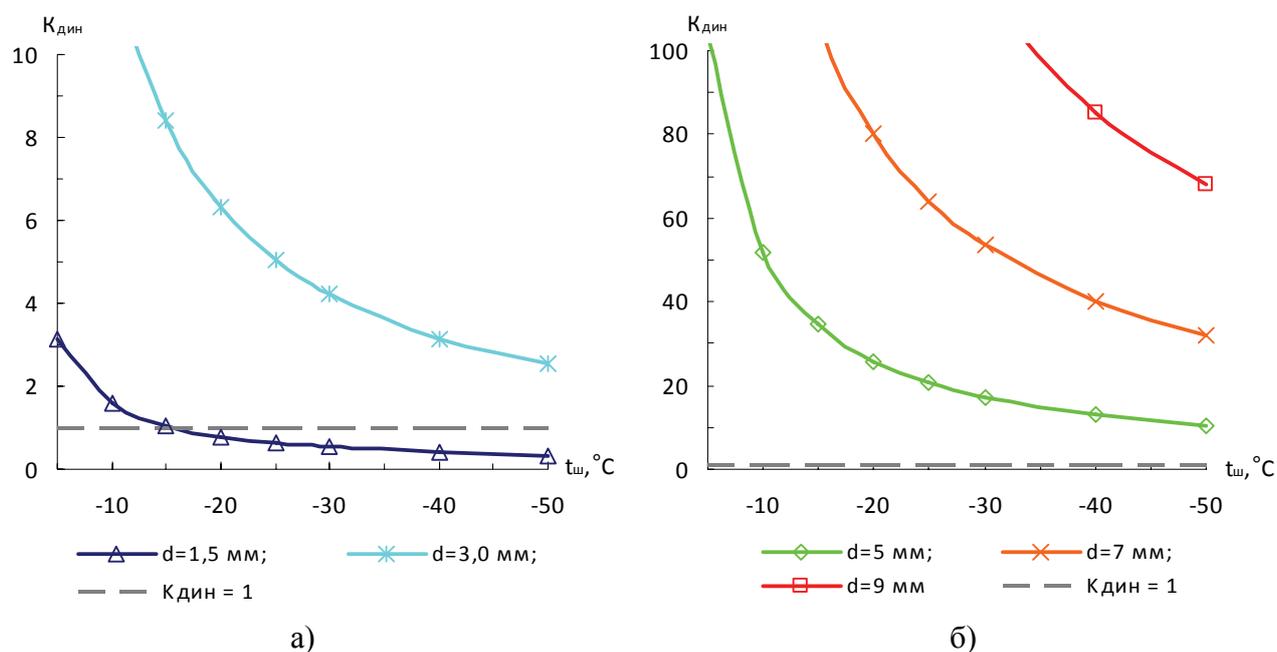


Рисунок 4 – Зависимость критерия инфильтрации $K_{\text{дин}}$ от температуры шлака при $m=0,40$ $R_{\text{кр}}=0,89$: а) для частиц с $d_{\text{ср}}=1,5$ (1–2) мм и 3 (2–4) мм; б) для частиц с $d_{\text{ср}}=5$ (4–6) мм; 7 (6–8) мм и 9 (8–10) мм

Для среднезернистого шлака с $d_{\text{ср}} = 1,5$ мм (1–2 мм) $K_{\text{дин}}$ меняется в пределах от 0,62 до 0,93 (рисунок 4, а). В этом случае полная замена частиц воды в динамическом канале лидирующего объема будет происходить только при температуре шлака выше -18 °C, где $K_{\text{дин}} \geq 1$. Если температура шлака ниже -18 °C, то критический слой льда на стенках канала – $R_{\text{кр}} = 0,89$ намерзает быстрее, чем происходит замена частиц лидирующего объема – $K_{\text{дин}} < 1$ (рисунок 4, а), и водопроницаемость шлака заметно снижается.

В четвертом разделе с целью проверки справедливости полученных результатов по критериальной оценке условий инфильтрации (раздел 3) и экспериментального установления критического размера частиц шлака, при котором инфильтрация водной составляющей пульпы либо полностью прекращается, либо снижается до значений существенно меньших расчетных, был проведен ряд контрольных экспериментов.

Для проведения дополнительных опытов из ПВХ пластин была изготовлена колонна высотой 2 м сечением 250×250 мм, заполненная смесью шлака 0,5...12 мм со следующими характерными размерами частиц: $d_{10} = 2,2$; $d_{50} = 4,8$; $d_{60} = 5,6$ мм, соответствующих однородному крупнозернистому шлаку. В 2/3-х нижней части по высоте колонны было размещено 10 датчиков температуры ДТС 024-50М.ВЗ.20/2. 7 цифровых термометров DS18B20 были размещены в верхней части. Первоначальное распределение температуры по высоте колонны было следующим: от дна колонны до 0,5 м температура шлака менялась от 0 до $-4,5$ °C; от 0,5 м до 1,5 м от $-4,5$ до -8 °C и от 1,5 м до 2 м от -8 до -28 °C. Вода в колонну подавалась с температурой $3,5$ °C и расходом 0,5 л/с. С на-

чала подачи воды лидирующий объем прошел колонну за 75 с, т. е. со средней скоростью 0,027 м/с. Температура воды на выходе из колонны постепенно повышалась от 0,1 до 3°C к концу опыта, длившегося 45 мин. Температура шлака по всей высоте колонны согласно показаниям датчиков также повысилась до 3°C.

В ходе эксперимента получен важный результат, подтверждающий гипотезу о сохранении лидирующим объемом способности перемещаться в поровых каналах переохлажденной пористой среды, в частности замороженного шлака, вследствие непрерывного замещения его частиц тыловыми частицами потока воды. Согласно показаниям датчиков температуры в верхних створах слоя замороженного шлака, порядка 20–30 см от поверхности, температура воды в тыловой части инфильтрационного потока непрерывно нарастает сразу вслед за прохождением лидирующего объема. В более глубокие створы – $h_{ш} > 30–50$ см вода поступает с температурой $t_{в}=0^{\circ}\text{C}$. Тем не менее, обладая высоким тепловым потенциалом в виде скрытой теплоты фазового превращения не замерзает, а замена частиц лидирующего объема придает ему способность к дальнейшему перемещению. Новые тыловые частицы воды, поступающие в данный створ, контактируют в условиях термодинамического равновесия с пленками льда, образовавшимися на стенках поровых каналов из частиц лидирующего объема, только что прошедшего данный створ.

На стенках поровых каналов образуется ледяная пленка, сохраняющаяся в течение относительно длительного периода времени. По результатам эксперимента зарегистрировано 20 с «жизни» пленки, что составило 1/3 времени прохождения лидирующим объемом всей толщи замороженного шлака. Этот слой льда значительно снижает гидравлическое сопротивление поровых каналов, что приводит к неожиданному повышению проницаемости замороженного шлака. Кроме того, тепловой потенциал воды с избыточной температурой – $t_{в} > t_{ф}$ способствует прогреву частиц шлака, контактирующих с инфильтрационным потоком воды, благодаря, во-первых, высокой теплоемкости воды, во-вторых, относительно быстрому движению инфильтрующегося потока.

В последующих экспериментах были получены следующие результаты: 1) поток воды в крупнозернистом шлаке представляет собой «инфильтрационный столб» цилиндрической формы с поперечным сечением несравнимо меньшим размеров шлакоотвала; 2) в среднезернистом шлаке с температурой – 25°C – 30°C наблюдается многократное снижение водопроницаемости с растеканием инфильтрующегося потока воды внутри слоя; 3) определен критический размер частиц шлака – $d_{кр} \leq 0,5–1,0$ мм, при котором его поры практически полностью перемерзают в процессе инфильтрации, и вода появляется на поверхности слоя шлака. Для проведения зимнего намыва дренированного шлакоотвала данная ситуация недопустима.

В пятом разделе предложена математическая модель температурного режима дренированного шлакоотвала, проведены численные исследования и сравнение результатов решения, получаемых с применением двух способов сопряжения контактирующих тел: классического – с условием Стефана, и предложенного автором – на базе уравнения сопряжения.

Дренированный шлакоотвал рассматривается в виде трех или четырех-слойной системы (рисунок 5). На внешней поверхности системы в течение года наблюдаются знакопеременные температурные возмущения: $t_n < t_{\phi}$, $t_n > t_{\phi}$, где t_n – температура наружного воздуха. Как следствие во влажных слоях возникают процессы промерзания в зимний и оттаивания в теплый периоды времени даже при наличии теплоизоляционного слоя. Возможное промерзание слоя намытого шлака 3 не столь опасно для зимнего намыва. Намытый шлак в дренированном шлакоотволе представляет собой пористое тело со свободными от воды порами, и, как уже показано, в случае возможного промерзания слой шлака сохраняет проницаемость для потока воды. Недопустимым с точки зрения зимнего намыва является промерзание дренажа 2, находящегося в водонасыщенном состоянии. Таким образом, материал и толщина теплоизоляционного экрана 4 должна приниматься из условия недопустимости прохождения фронта промерзания 5 в дренаж 2.

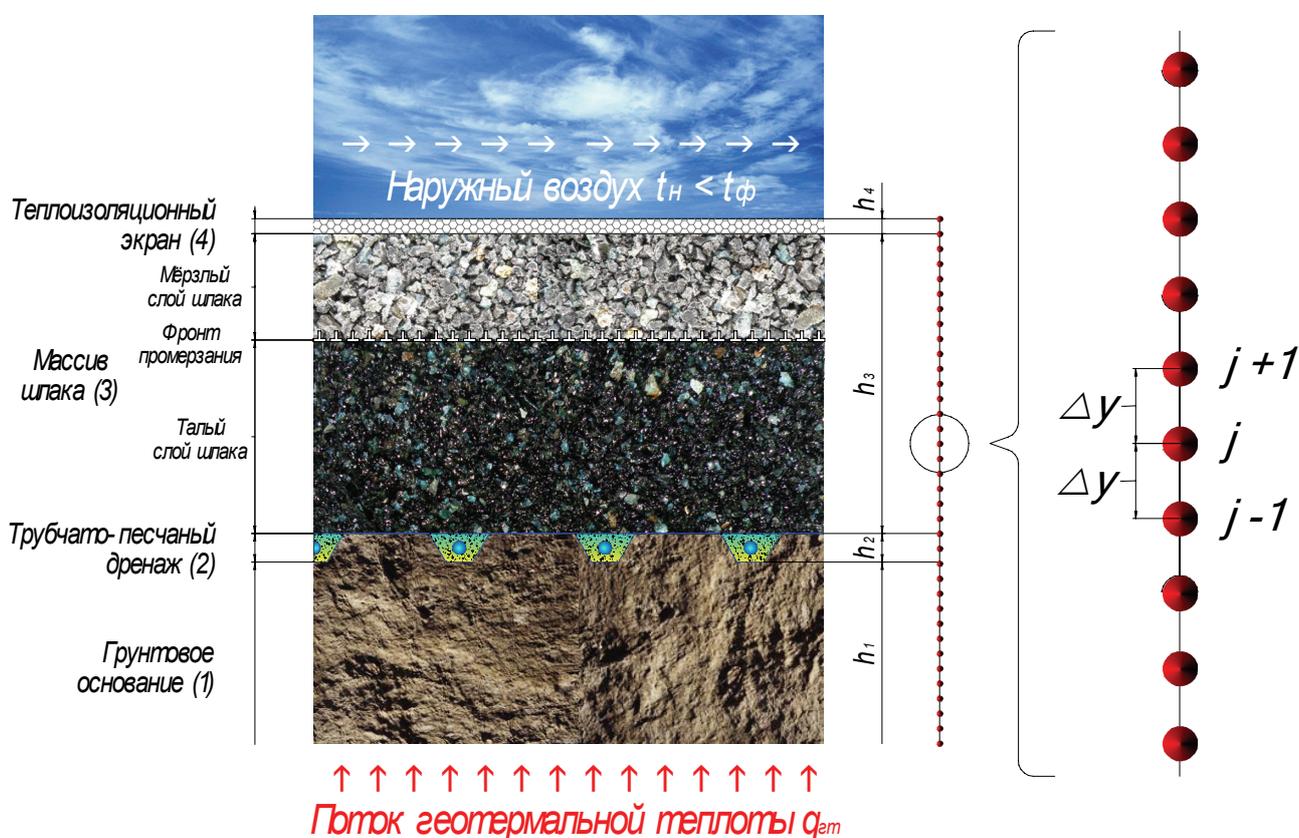


Рисунок 5 – Расчетная схема

Золошлакоотвалы и, в частности, дренированные шлакоотвалы, имеют распластанный профиль: минимальная площадь, занимаемая гидроотвалами тепловых станций, составляет порядка 10 га. Если в плане дренированный шлакоотвал рассматривать в виде квадрата, то для указанных площадей сторона квадрата будет порядка 320 м, а суммарная высота дренированного шлакоотвала вместе с его основанием – не более 30 м, что в десять раз меньше его размеров в горизонтальном направлении. Кроме того инфильтрация водной составляющей пульпы происходит в пределах «инфильтрационного столба», поперечное сечение которого в сотни раз меньше размеров шлакоотвала. Это позволяет считать, что температурное поле будет автомодельно по отношению к го-

горизонтальным пространственным координатам, например, оси X (рисунок 5). Основные изменения температуры во времени будут наблюдаться в вертикальном направлении – по оси Y. Поэтому поставленная задача может решаться в одномерной постановке.

Математическая модель температурного режима многослойной многофронтной системы, какой является дренированный шлакоотвал, представляется совокупностью уравнений теплопроводности, записанных для внутренних точек i -х слоев, находящихся либо в талом, либо в мерзлом состояниях. Для поверхности «теплоизоляционный экран 4 – приповерхностный слой шлака 3» и на подвижной границе промерзания (оттаивания) – ξ – в слое шлака между мерзлой и талой его частями в момент промерзания (оттаивания), вместо традиционных граничных условий IV рода (условий Стефана) применяются соответствующие уравнения сопряжения:

на поверхности «экран 4 – приповерхностный слой шлака 3»

$$0 = \left(\lambda_4 \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \Big|_{\xi} \pm 0,5 q_{\phi} \rho_3 \frac{\partial W_3}{\partial \tau}, \quad (6)$$

на подвижной границе промерзания (оттаивания) – ξ в слое шлака 3

$$0 = \left(\lambda_{3m} \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \Big|_{\xi} \pm q_{\phi} \rho_3 \frac{\partial W_3}{\partial \tau}; \quad (7)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя, Вт/(м·К); W_3 – влажность шлака.

На внешних границах шлакоотвала кроме начального условия $t(y, 0) = t_0(x)$ установлены следующие граничные условия:

в подошве основания I действует геотермальный поток теплоты интенсивностью $q_{г.т}$ (рисунок 5)

$$-\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = q_{г.т}, \quad (8)$$

на поверхности шлакоотвала с теплоизоляционным экраном и без него в зимнее и летнее время применялись обычные граничные условия III рода.

Для случая перехода из зимы в лето, когда шлак еще находится в мерзлом состоянии, также использовались граничные условия III рода с учетом фазовых превращений приповерхностного слоя шлака в виде

$$\alpha(t_{\pi} - t_{\phi}) \Big|_{y=h_{\pi}} = -\lambda_3 \frac{\partial t}{\partial y} + q_{\phi} \rho_3 \frac{\partial W_3}{\partial \tau} \delta y. \quad (9)$$

Задачи для вариантов с теплоизоляционным экраном и без него в виде системы уравнений теплопроводности и уравнений сопряжения вида (6), (7) с начальными и граничными условиями, куда входили условия (8), (9), решались

с применением явной конечноразностной схемы по алгоритму, схожему с известным алгоритмом Ю. А. Попова. В отличие от указанного алгоритма здесь принят не температурный диапазон фазовых превращений, что характерно для связных грунтов, а однозначная величина температуры фазовых превращений, равная 0°C или близкой к ней температуре с учетом минерализации водной составляющей пульпы. Далее скачкообразное перемещение подвижной границы на один шаг выполнялся с температурной компенсацией, т. к. в момент скачкообразного перемещения границы в следующую узловую точку температура в этой точке t_j отлична от t_{ϕ} – в случае промерзания $t_j > t_{\phi}$, а в случае оттаивания $t_j < t_{\phi}$.

Расчет температурного режима шлакоотвала проведен для г. Читы, где наблюдаются наиболее суровые, для рассматриваемого климатического района, условия. Из решения задачи видно, что температурное состояние шлакоотвала согласно данным по незамерзаемости воды в промороженном шлаке в статических и динамических условиях взаимодействия позволяет проводить зимний намыв шлака даже без использования теплоизоляционного экрана (рисунок 6). Однако при его наличии глубина промерзания слоя шлака окажется значительно меньше. Например, к концу зимы, в феврале, марте месяцах, без экрана глубина промерзания достигает 1,95 м, в то время как с экраном – 0,9 м. (рисунок 6). Кроме того, под экраном температура замерзания шлака не опускается ниже -10°C , а без экрана на поверхности отвала -26°C .

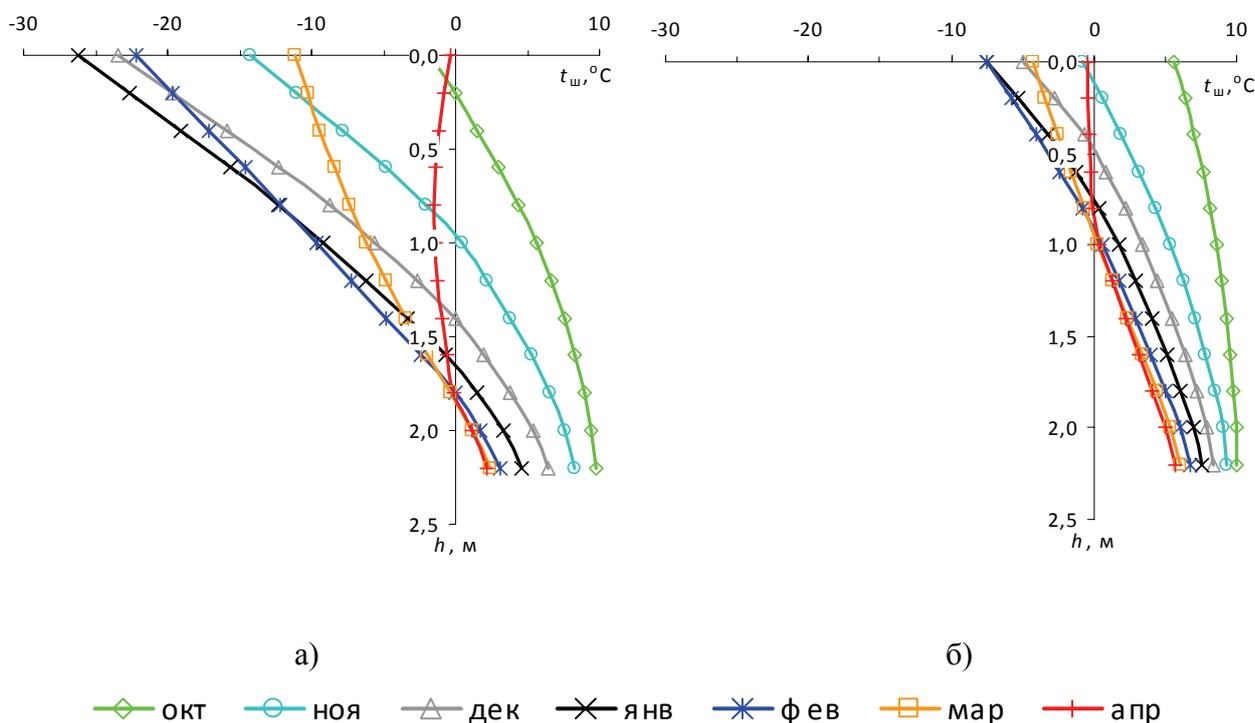


Рисунок 6 – Распределение температуры в слое шлака на третий год эксплуатации:
 а) без теплоизоляционного экрана; б) с теплоизоляционным экраном

Результаты математического моделирования с традиционным условием Стефана и примененного автором уравнения сопряжения сравнивались с результатами физического моделирования (рисунок 7).

В качестве объекта исследования использовался слой влажного шлака толщиной 2,0 м с граничными условиями I рода на верхней и нижней его поверхностях. При этом на верхней поверхности моделируемого шлакоотвала в качестве граничного условия I рода устанавливалось значение среднезимней температуры равной -11°C , а протяженность зимнего периода равной пяти месяцам, т. е. климатические условия характерные для большинства сибирских городов. Физическая модель объекта была изготовлена с геометрическим масштабом 1:10 с соблюдением основных положений теории подобия.

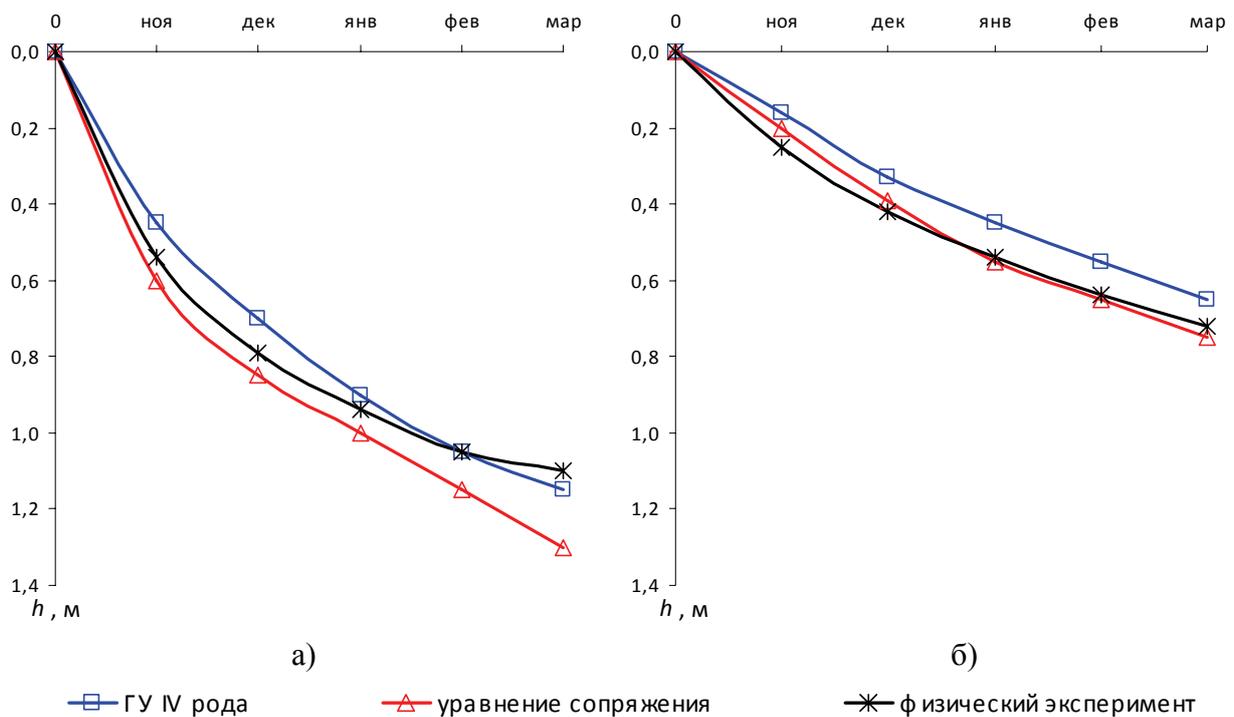


Рисунок 7 – Глубина промерзания слоя шлака по месяцам зимнего периода:
 а) промерзание без экрана; б) промерзание под защитой экрана

Сравнение приведенных на рисунке 7 графиков показывает, что оба подхода дают результаты близкие к значениям, полученным в ходе физического моделирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Теоретически обоснована и экспериментально доказана принципиальная возможность проведения круглогодичного намыва дренированных шлакоотвалов тепловых электростанций.

2. Впервые получены критерий определяющий количество воды, остающейся в жидкой фазе при статическом взаимодействии с частицами промороженного шлака, и критерий, определяющий условия продвижения фронта инфильтрационного потока в порах промороженного шлака. Показано, что в суровых климатических условиях критерий инфильтрации выполняется с многократным запасом, что подтверждено экспериментально фактом протекания воды через промороженный до температуры -28°C шлака.

3. Экспериментально установлены зависимости количества воды, оставшейся в подвижном состоянии после статического контакта с мерзлым шлаком,

от времени контакта, гранулометрического состава и температур шлака и воды. Экспериментально подтверждена гипотеза о сохранении лидирующим объемом способности перемещаться в каналах переохлажденной пористой среды вследствие непрерывного замещения его частиц тыловыми частицами потока воды. Определен критический размер частиц шлака, ниже которого замороженный шлак становится непроницаем для воды.

4. Разработана и реализована математическая модель многолетнего температурного режима дренированного шлакоотвала в условиях круглогодичного намыва шлака, предложен вычислительный алгоритм и составлена компьютерная программа, позволяющие производить расчет многолетнего температурного режима шлакоотвала с выбором параметров теплоизоляционного экрана, не допускающего промерзания дренажа в длительный зимний период года.

5. Установлено, что применение теплоизоляционного экрана позволяет производить круглогодичный намыв шлака, предотвращая промерзание дренажа даже в начальной стадии возведения дренированного шлакоотвала, когда толщина намывного слоя шлака незначительна. Большая часть охлаждающего температурного напора гасится в теплоизоляционном экране. Под экраном толща замороженного шлака имеет относительно высокую температуру порядка -10°C , которая свободно преодолевается инфильтрационным потоком воды.

Публикации отражающие основное содержание работы

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:

1. **Хаглеев, П. Е.** Влияние параметров замороженного шлака на количество подвижной воды в условиях статического взаимодействия / П. Е. Хаглеев, Е. П. Хаглеев, Т. А. Кулагина // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 6 (2011 4) 675–687;

2. **Хаглеев, П. Е.** О возможности продления срока намыва шлака в дренированный шлакоотвал / П. Е. Хаглеев, Е. П. Хаглеев // Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. 2010. – № 5-6. – С. 96–104.

Статьи, опубликованные в других изданиях и материалах научно-технических конференций:

3. **Хаглеев, П. Е.** Математическая модель индукционного перемешивания расплава в миксере-копильнике / Е. П. Хаглеев, П. Е. Хаглеев, В. Н. Тимофеев, Р. М. Христинич // Вестник КГТУ. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 1996. – Вып. 3. – С. 55–62.

4. **Хаглеев, П. Е.** Экспериментальная проверка калориметрического критерия незамерзаемости воды в замороженном шлаке / П. Е. Хаглеев // Экологические проблемы промышленных городов: Материалы V Всероссийской НПК с международным участием; ред. Е. И. Тихомирова. – Саратов, 2011. – С. 107–109.

5. **Хаглеев, П. Е.** Калориметрический критерий сохранения воды в жидкой фазе в замороженном шлаке / П. Е. Хаглеев // Экологическая безопасность регионов России и риск от техногенных аварий и катастроф: Материалы XI Международной НПК. – Пенза, 2011. – С. 88–92.

6. Хаглеев, Е. П. Критериальная оценка условий движения фронта инфильтрации воды в замороженном шлаке / Е. П. Хаглеев, **П. Е. Хаглеев** // Экологическая безопасность регионов России и риск от техногенных аварий и катастроф: Материалы XI Международной НПК. – Пенза, 2011. – С. 66–70;

7. Хаглеев, Е. П. Круглогодичный намыв шлака в дренированный шлакоотвал ТЭС / Е. П. Хаглеев, **П. Е. Хаглеев** // Техника и технологии: пути инновационного развития: материалы Международной НПК; ред. А. А. Горохов. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. 2011. – С. 151–160.

8. **Хаглеев, П. Е.** Экспериментальная оценка теплового баланса водной составляющей пульпы и замороженного шлака в статических условиях / П. Е. Хаглеев, Е. П. Хаглеев // Перспективное развитие науки, техники и технологий: материалы Международной (заочной) НПК. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. 2011.

9. Хаглеев, Е. П. Экспериментальная установка моделирования температурного режима шлакоотвала с теплоизоляционным экраном / Е. П. Хаглеев, **П. Е. Хаглеев** // Перспективное развитие науки, техники и технологий: материалы Международной (заочной) НПК. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. 2011.

10. **Хаглеев, П. Е.** Моделирование фазовых превращений в сопряженных задачах теплообмена / Е. П. Хаглеев, П. Е. Хаглеев // Вычислительная математика, дифференциальные уравнения, информационные технологии: Материалы Международной конференции; ред. Н. Б. Цыренжапов. – Улан-Удэ, 2009. – С. 244–252.

11. **Хаглеев, П. Е.** К технологии возведения дренированных золоотвалов / Е. П. Хаглеев, П. Е. Хаглеев // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы IX Всероссийской НПК; ред. М. С. Пронин. – Красноярск: МВДЦ «Сибирь», 2008. – С. 90–94.

12. **Хаглеев, П. Е.** Численное моделирование задачи магнитной термогидродинамики при перемешивании расплава в миксере копильнике / Е. П. Хаглеев, П. Е. Хаглеев // Труды второй российской национальной конференции по теплообмену. Том 6. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – С. 216–219.

Патент:

13. Пат. 2410540 Российская Федерация, МПК E21C 41/26. Способ возведения дренированного шлакоотвала / Е. П. Хаглеев, **П. Е. Хаглеев**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – 2009134024/03; заявл. 10.09.2009; опубл. 27.01.2011; Бюл. № 3.

Подписано в печать 16.04.2012. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 7372

Отпечатано полиграфическим центром Библиотечно-издательского комплекса Сибирского федерального университета/ 660041 Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел/факс (391)206-26-58, 206-26-49/ E-mail: print_sfu@mail.ru; http://lib.sfu-kras.ru