

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГОРНАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ

На правах рукописи

НАЗИМКО Елена Ивановна

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТОПОЛОГИИ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ  
ОБОРОТНЫХ ВОД УГЛЕБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

Специальность 05.15.08 - "Обогащение полезных ископаемых"

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК - 1997



00737936 (Z)

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Донецком Государственном техническом университете (ДонГТУ).

Научный консультант

Лауреат Государственной премии Украины, Зборщик  
доктор технических наук, профессор Михаил Павлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Шупов Л.П.

доктор технических наук, профессор Младецкий И.К.

доктор технических наук Полулях А.Д.

Ведущая организация – Украинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по обогащению и брикетированию углей "УкрНИИУглеобогащение", г. Луганск

Защита состоится "2" мая 1997 г. в 10 часов на заседании специализированного совета Д 03.06.01 при Государственной горной академии Украины по адресу: 320027, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса. 19

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственной горной академии Украины.

Автореферат разослан "20" мая 1997 г.

Ученый секретарь

специализированного совета,

канд.техн.наук, ст.научн. сотрудник  А.В. Зберовский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы: Удельный общий расход воды на обогащение угля составляет от 1 до 6 м<sup>3</sup> /т, свежей воды - 0.3 м<sup>3</sup> /т, в том числе 0.01-0.04 м<sup>3</sup> /т питьевой. Для очистки повторно используемой воды от взвесей на углеобогащательных фабриках используются системы осветления, которые представляет собой сложный комплекс, включающий классификацию частиц, осветление шламовых вод, сгущение и обезвоживание шламов, обезвоживание и складирование продуктов обогащения. Несмотря на технический прогресс систем осветления в направлении отказа от наружных очистных сооружений и осветлении циркулирующей воды внутри технологической схемы предприятия, до настоящего времени илосборники и шламовые бассейны являются обязательным звеном на многих фабриках и способствуют загрязнению окружающей среды. Эти сооружения занимают площадь около 3 млн. м<sup>2</sup> земли, на их эксплуатацию и поддержание расходуются значительные средства, что отрицательно сказывается на экономике предприятий. Поэтому необходимо свести к технически возможному минимуму потребление воды из внешних источников, исключить выпуск воды и шламов за пределы наружных очистных сооружений. В технологии переработки угля водно-шламовые процессы с каждым годом занимают все больший удельный вес в связи с постоянным увеличением количества мелких классов в добываемых углях (до 30%). Наличие в углях мелочи и размокаемых пород приводит к необходимости не только очистки вод, но и обогащения шламов. При этом эффективная работа системы осветления (регенерации) оборотной воды должна обеспечивать необходимое содержание твердого в ней (50-80 кг/м<sup>3</sup>), от чего также зависит качество товарных продуктов, получаемых гравитационными методами.

На углеобогащательных фабриках имеется большое разнообразие систем осветления. Это обусловлено сложностями при обработке шламовых вод, применением большого количества машин и аппаратов, различиями в свойствах шламов. Большинству систем осветления присущ ряд существенных недостатков. Среди них основное отрицательное влияние

оказывает наличие в системах циркулирующих нагрузок, способствующих образованию тонких трудноуправляемых шламов. Поэтому в процессе эксплуатации системы постоянно изменяются и совершенствуются. При этом специалисты используют накопленный опыт своего и других предприятий, часто полагаясь на интуицию. Такой случайный выбор решений не всегда дает положительные результаты. Известные аналитические методы расчета сложны и трудоемки, кроме того они не позволяют дифференцированно оценивать отдельные потоки системы.

В связи с этим возникает проблема разработки методов имитационного моделирования с применением компьютерных технологий процессов, происходящих при накоплении и циркуляции потоков в системах освещения, которые позволяли бы оценивать работу действующей системы и прогнозировать показатели для проектируемых вариантов; выбирать лучший вариант ее топологии, не требующий коренной реконструкции и больших капитальных затрат.

#### Связь темы диссертации с планом основных работ института.

Диссертация выполнена в рамках государственной программы по разработке экологически чистых и ресурсосберегающих технологий, код программы 04 (номера госрегистрации тем 01900015705, 0193U027062). Автор принимала в исследованиях непосредственное участие в качестве научного руководителя.

Целью работы является развитие научных основ совершенствования систем освещения углеобогатительных фабрик, разработка и внедрение способов повышения эффективности освещения оборотных вод.

Идея работы заключается в рассмотрении системы освещения углеобогатительной фабрики как открытой термодинамической системы, находящейся в неравновесном состоянии.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели в работе использованы: фундаментальные положения термодинамики необратимых процессов; теория графов; численное и итерационное моделирование процессов накопления шламов в системе с применением компьютерных технологий; экспериментальные исследования изменения коэффициентов

распределения шламов в аппаратах системы и их сепарационных характеристик; методы мониторинга содержания шлама в основных потоках системы регенерации; промышленные испытания способов повышения эффективности осветления оборотных вод.

Основные научные положения, выносимые на защиту, и их новизна.

1. Качество работы системы осветления как открытой термодинамической системы определяется производством энтропии, основными материальными источниками которого являются производство шлама за счет внутренних процессов, циркуляция и объединение ранее разделенных потоков, а также флуктуации питания шлама на входе системы.

2. Управление работой системы (уменьшение производства энтропии) может осуществляться регулированием термодинамических сил и потоков системы; основными управляемыми технологическими факторами являются концентрация шлама в потоках и интенсивность его выведения из системы в целом.

3. Снижение концентрации шламов в оборотной воде может быть достигнуто при искусственном сбросе питания на входе в систему; при этом не имеет значения, каким путем достигается определенная величина площади сброса питания – за счет длительности сброса или его амплитуды.

4. Качество работы системы осветления оценивается показателем интенсивности выведения из нее шлама, который представляет собой отношение количества выводимого шлама к количеству шлама в системе на каждом цикле работы. Именно такой подход дает возможность достоверно моделировать процессы, происходящие в системе при циркуляции потоков при любой сложности ее топологии.

5. Разработана иерархия поиска решения по совершенствованию работы системы осветления, включающая принятие критерия оптимизации в виде минимума производства энтропии при ее работе, физическим эквивалентом которой является относительное количество шлама в оборотной воде, с дальнейшим алгоритмом действий в направлении определения коэффициентов распределения шлама узлами действующей системы, имитационного моделирования ее работы, последующего

перераспределения потоков и нахождения рациональной топологии системы. Именно такое направление действий, подчиняющееся принципу "от общего к частному", гарантирует определение оптимальной топологии системы осветления в отличие от существующих подходов.

Выносимые на защиту научные положения определяют теоретические основы и принципы управления работой систем регенерации, использование которых позволяет обеспечивать эффективное осветление оборотных вод углеобогатительных фабрик путем обоснованного выбора их оптимальной топологии.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием фундаментальных положений термодинамики необратимых процессов, позволяющей глубоко и всесторонне анализировать сложные явления в системах; подтверждается использованием методов математического компьютерного моделирования (теории графов и итерационных методов); экспериментальными исследованиями в натуральных условиях коэффициентов перераспределения и колебания количества шлама; промышленными испытаниями направлений совершенствования систем осветления; удовлетворительной сходимостью расчетных значений содержания шлама в потоках и измеренных в промышленных условиях.

Научное значение работы заключается в развитии теоретических основ процессов, происходящих в системе при накоплении и циркуляции шлама в технологических потоках в целом, а не в отдельных ее узлах и аппаратах. Созданная численная модель позволяет качественно и количественно оценивать и прогнозировать явления, протекающие при циркуляционных процессах. Это дает возможность управлять потоками систем осветления с учетом рационального сочетания аппаратов и их взаимосвязи без значительных капитальных затрат.

#### Практическое значение работы

1. Установлено, что эффективная работа системы осветления характеризуется значением показателя интенсивности выведения шлама из системы, равным 0.4-0.5.

2. Установлена количественная зависимость между площадью сброса питания на входе в систему и снижением количества шлама в оборотной воде, что позволяет регулировать накопление шламов в системе.

3. Установлены количественные зависимости между плотностью питания и извлечением тонкого и зернистого шлама в продукты стустительных аппаратов, что повышает точность и достоверность результатов численного имитационного моделирования.

4. Установлены количественные зависимости по влиянию гранулометрического состава шламов на эффективность работы радиальных стустителей и гидроциклонов, в частности пределы увеличения средневероятного отклонения от 0.44 до 0.63 мм при увеличении содержания тонких частиц в питании гидроциклонов от 10 до 60%.

5. Разработана численная модель для компьютерного имитационного моделирования процессов, происходящих в замкнутых технологических системах при детерминированном и стохастическом вводе питания, что позволяет прогнозировать, оценивать и улучшать их работу на стадии проектирования и в период эксплуатации.

6. Разработаны новые способы управления работой систем осветления оборотных вод, базирующиеся на оптимальном сочетании аппаратов и их взаимосвязей, поддержании оптимальной циркуляции шлама и инерционности системы, максимальном устранении слияния разделенных ранее потоков, нахождении оптимального сочетания количества потоков разной крупности, поддержании коэффициента циркуляции шлама на уровне не более 1,3-1,5, что позволяет снижать накопление шламов в системе.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Установленные рациональные варианты топологии систем внедрены при реконструкции систем осветления на ЦОФ "Чумаковская", "Пролетарская" и "Луганская". При этом зольность флотоконцентрата снижена на 0,2%, потери горючей массы с отходами уменьшены на 2%. Экономическая эффективность внедрения рекомендаций на ЦОФ "Чумаковская" составила 123.5 тыс. рублей в ценах 1989 года. Общий экономический эффект по объединению

“Донецкуглеобогащение” по состоянию на начало 1997 г. составляет около 1,2 млн. гривней.

Результаты работы переданы проектным организациям. Они включены в учебное пособие с грифом Минвуза Украины “Проектирование углеобогажительных фабрик” (К.: УМК ВО, 1992. -284с.), и используются при чтении курсов “Проектирование обогатительных фабрик”, “Обезвоживание, кондиционирование, очистка сточных и оборотных вод”, при выполнении курсовых и дипломных проектов студентами специальности 0903 “Обогащение полезных ископаемых”.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались и получили одобрение на: семинаре института УкрНИИУглеобогащение (Луганск, 1991); научных конференциях по обогащению углей (Донецк, 1990, 1992, 1994); международных научных конференциях (Донецк, 1994; Магнитогорск, 1994; Монреаль, 1995); технических совещаниях объединений “Луганскуглеобогащение”, “Донецкуглеобогащение” (1991, 1994); в институте ДонГИПРОшахт (1997).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 научных работ, в том числе учебное пособие и 6 авторских свидетельств на изобретение. Лично автором опубликовано 5 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 141 рисунок, 43 таблицы, список литературы из 177 наименований и 4 приложения. Объем работы 356 страниц.

Декларация конкретного личного вклада в разработку научных результатов, вынесенных на защиту, состоит в формулировании научной проблемы, цели, научных положений и задач исследований, теоретическом обосновании и создании научных основ топологии систем освещения, разработке метода имитационного моделирования процессов, происходящих в системе при циркуляции и накоплении шламов, анализе с помощью разработанного метода работы действующих и проектируемых систем освещения, внедрении результатов исследований.

Автор выражает признательность проф. Зборщику М.П. за помощь и консультации при выполнении исследований, их анализе и обобщении,

коллективам кафедр Обогащения полезных ископаемых ДонГТУ и ГГАУ и ведущим специалистам указанных университетов за конструктивные обсуждения работы на стадии ее завершения. Автор также выражает искреннюю благодарность инженерно-техническим работникам ЦОФ "Чумаковская", "Узловская", "Пролетарская", "Луганская" и специалистам ПО Донецкуглеобогатение за содействие при выполнении экспериментов, промышленной проверке и внедрении результатов исследований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Научному обоснованию и реализации способов повышения эффективности осветления оборотных вод углеобогатительных фабрик посвящено большое количество исследований, особенно в области моделирования процессов и оптимального управления технологическими системами. Существенный вклад в решение этой проблемы внесли Бедрань Н.Г., Богданов О.С., Борц М.А., Бутовецкий В.С., Глембоцкий В.А., Гураль В.Г., Денисенко А.И., Зарубин Л.С., Зозуля И.И., Каминский В.С., Кармазин В.И., Классен В.И., Коткин А.М.; Младецкий И.К., Пилов П.И., Плаксин И.Н., Поваров А.И., Самойлик Г.В., Серго Е.Е., Тресков Е.Г., Туркенич А.М., Фоменко Т.Г., Шупов Л.П. и др., среди зарубежных ученых Баттаглия А., Висман Д., Травинский Г. и др. Эти исследования являются основой для глубокого понимания функционирования систем осветления и благодаря им достигнут высокий уровень управления угольными ЦОФ с помощью систем автоматического управления (САУ). Эти системы хорошо работают с комплексами процессов и отдельными узлами. Однако они не предназначены для регулирования системы осветления в целом и особенно при изменении ее топологии. Достигнутые результаты целесообразно дополнить исследованиями по оптимизации работы системы осветления как целого технологического объекта с точки зрения накопления шламов, перераспределения и циркуляции потоков. В структуре системы осветления можно выделить две взаимосвязанные системы. Общая (большая) система включает компоновку аппаратов и потоков. Локальная (малая) система - это отдельные узлы, которые также подлежат регулированию. Часто возникают

ситуации, когда при оптимальной работе всех узлов (исчерпаны все их возможности), общая система все же не работает в оптимальном режиме. Это значит, что нужно искать пути повышения эффективности работы общей системы. Следует отметить сложность решения этой проблемы, так как число вариантов сочетания узлов даже для типовой системы с учетом технологических ограничений достаточно велико. Особенно сложным является выбор критерия оптимизации системы.

Анализ работы действующих предприятий позволил установить следующие недостатки: во многих случаях работа системы осветления ограничивает повышение качества концентрата, снижение потерь горючей массы и сокращение выбросов углесодержащих материалов в окружающую среду; из-за высокого содержания шламов в оборотной воде уменьшается эффективность разделения сырья отдельными узлами и схемой в целом.

В проектах не просматриваются принципиально новые решения проблемы, схемы принимаются традиционными.

Известные аналитические методы расчета систем осветления имеют ряд ограничений из-за сложности применения. Использование в расчетах только коэффициента циркуляции шлама оказывается недостаточным. Это значит, что необходим более глубокий анализ кинетики работы систем осветления.

Исходя из изложенного выше сформулирована цель работы. Для ее достижения необходимо решение следующих задач.

1. Разработать теоретические основы, определить особенности и закономерности накопления шламов в оборотной воде при циркуляции потоков.

2. Разработать гибкую модель накопления шлама в системе с учетом реальной работы системы осветления, т.е. с учетом наличия многообразия топологии схем, конкретного вклада каждого узла схемы в общее накопление, роль процессов обогащения в накоплении и выведении шлама, роль времени циркуляции оборотной воды (количество циклов).

3. Произвести анализ и оценить работу действующих и проектируемых систем осветления с помощью разработанного метода имитационного

моделирования, выявить основные закономерности накопления и выведения шлама.

4. Разработать принципы оптимального проектирования новых и совершенствования работы существующих систем осветления, провести их промышленные испытания.

Во второй главе разработаны теоретические основы накопления шламов, базирующиеся на рассмотрении системы осветления как типичной открытой термодинамической системы, т.к. она пропускает через себя поток вещества (питание в виде пульпы и готовые продукты в виде осветленной воды, влажных и сыпучих материалов) и энергии. Поэтому при анализе работы системы осветления могут быть использованы фундаментальные положения термодинамики необратимых процессов, дающей наиболее общие характеристики состояния макроскопической системы. Возникающие процессы переноса стремятся выровнять неоднородности в распределении плотности пульпы и скорости, приближая систему к равновесию. Процессы переноса характеризуются соответствующими потоками, в частности градиент концентрации шлама вызывает поток массы. Наибольший интерес представляют потоки шлама, которые порождаются обобщенными термодинамическими силами: градиентом давления, создаваемого в системе насосами; градиентами давления и скорости в гидроциклонах и центрифугах, в отстойниках и классификаторах и т.д. Потоки шлама  $I_s$  линейно связаны с порождающими их термодинамическими силами  $X_k$  (например, градиент концентрации) уравнением:

$$I_s = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k, \quad (1)$$

где  $L_{ik}$  - соотношения взаимности Онзагера.

Каждая из термодинамических сил вносит свой вклад в общий поток пропорционально коэффициентам  $L_{ik}$ . Критерием термодинамических потоков может служить концентрация шлама (в оборотной воде 50-100 кг/м<sup>3</sup>, в песках гидроциклонов - 200-700 кг/м<sup>3</sup>), которая является параметром,

позволяющим описывать математически и анализировать работу системы освещения.

Уравнение (1) справедливо для линейного необратимого термодинамического процесса, когда вся система фабрики, включая систему регенерации оборотной воды, вышла на основной стационарный режим работы. В термодинамике необратимых процессов, такой режим называется равновесным.

Функционирование системы освещения как типичной необратимой термодинамической системы определяется в первую очередь вторым законом термодинамики:

$$dS / dt = dS_e / dt + dS_i / dt \quad (2)$$

где  $S$  - энтропия системы. Индексы  $e$  и  $i$  обозначают изменение энтропии за счет внешних источников и внутренних процессов в системе.

В работе под энтропией системы освещения подразумевается функция вероятностного состояния, отражающая степень упорядоченности продуктов (потоков), возникающих в результате ее работы. Конечные продукты имеют более высокую упорядоченность, чем их исходная смесь. Чем выше упорядоченность, тем меньше энтропия. Следовательно, изменение энтропии системы освещения, исходя из фундаментальных положений термодинамики, определяется произведением вышперечисленных сил на потоки шлама:

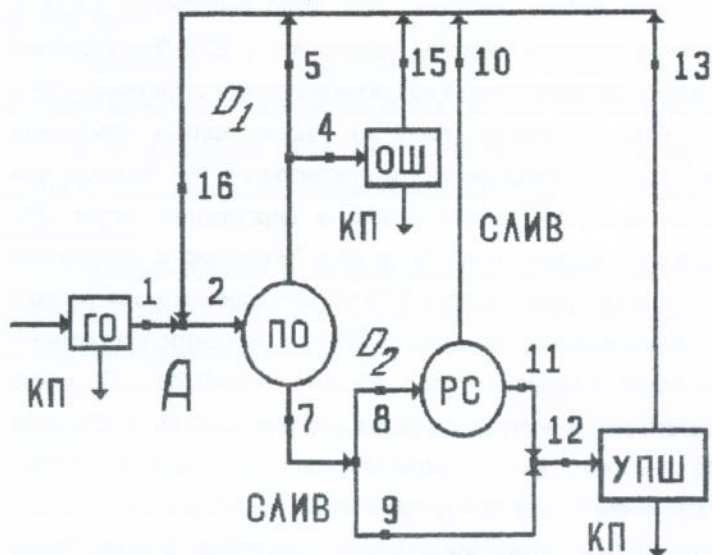
$$\Delta S = 1 / T \sum X_k I_s \quad (3)$$

где  $T$  - температура, при которой происходят шламовые процессы,  $^{\circ}\text{K}$ .

Анализ уравнения (2) показал, что применительно к системе освещения приращение энтропии за счет внешних источников  $dS_e$  связано с поступлением шлама с рядовым углем (положительное приращение). Отрицательное приращение энтропии связано с разделением продуктов по зольности, плотности, влажности, размеру зерен и т. д. Производство энтропии может быть только положительным и связано с дополнительным шламообразованием в аппаратах технологической и водно-шламовой систем фабрики, а также с другими нежелательными необратимыми процессами.

Энтропийный критерий позволяет дать не только качественную, но и количественную оценку работы системы. Для этого выполнены расчеты энтропии для потоков типичной системы освещения - ЦОФ "Никитовская" (рис. 1), которая имеет слияние потоков из гравитационного отделения (ГО) и возвратов из системы освещения (точка А). Анализ кривых изменения энтропии потока 2 (рис. 2) показывает, что его энтропия тем больше, чем больше количество продукта, направляемого в циркуляцию (поток D1). Наличие максимума на кривых (точка Б на рис. 2) связано с сочетанием объема циркулирующей нагрузки (потоки 5,15,10) и соединяющихся потоков (15 и 1, 11 и 9). Максимальное значение (0,9997) имеет энтропия потока 2 при  $D_1 = 1$  (весь поток 3 направляется в оборот) и  $D_2 = 0,25$  (25% слива пирамидальных отстойников поступает в радиальный сгуститель, а 75% идет на флотацию без сгущения). При этом доли потоков 1 и 2 близки ( $p_1 = 0,4932$ ,  $p_2 = 0,5068$ ). Это значит, что такое распределение потоков является наиболее неблагоприятным с точки зрения накопления шлама в схеме. Таким образом, соединение потоков, разделенных ранее и сильно отличающихся параметрами разделения, с точки зрения термодинамики заведомо неэффективно (убыточно), так как содействует производству энтропии. Такие ситуации возникают при возвратах потоков в гравитационное отделение и при их слиянии. Для этой же системы освещения были выполнены расчеты по затратам энергии на обработку потоков шламовых вод при наличии их циркуляции. При этом принято, что количество условной энергии, затрачиваемой на обработку потоков системы, равно единице на первом цикле работы и пропорционально количеству обрабатываемых шламов на последующих циклах работы системы. Расчеты показали, что при появлении возвратных циркулирующих потоков условная энергия возрастает. При максимальных значениях доли циркулирующих потоков  $D_1$  и  $D_2$  на 10-м цикле работы еще не достигается стабильное значение условной энергии. Таким образом, условная энергия системы освещения и соответственно энтропия возрастает за счет увеличения количества и объема циркулирующих потоков шлама, при котором происходит производство дополнительного количества тонкого шлама в системе.

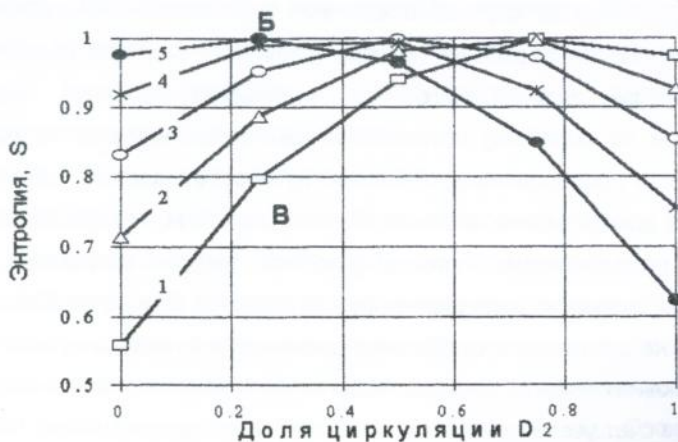
Блочное изображение системы освещения



К П – конечные продукты, Г О – гравитационное отделение, П О – пирамидальные отстойники, О Ш – обезвоживание шлама, У П Ш – узел переработки шлама, Р С – радиальный сгуститель

Рис. 1

Изменение энтропии потока 2 в зависимости от доли циркуляции  $D_1$



1 -  $D_1 = 0$ ; 2 -  $D_1 = 0,25$ ; 3 -  $D_1 = 0,5$ ; 4 -  $D_1 = 0,75$ ; 5 -  $D_1 = 1$

Рис. 2

На основе проведенного качественного и количественного анализа можно находить сочетания шламовых потоков, обеспечивающих минимум энтропии системы осветления, а значит и минимальное накопление шлама. Например, с учетом технологических возможностей данной схемы и ситуации на рынке сбыта оптимальным сочетанием потоков может быть следующее:  $D1=0$ ,  $D2=0.25$  (точка В на кривой 1 рис. 2).

Для обеспечения минимума энтропии система осветления должна иметь устойчивый режим работы. Устойчивость работы системы осветления как термодинамической системы исследуется через разложение энтропии по возмущениям вблизи равновесного состояния. Подействовав на систему, находящуюся вблизи равновесного значения  $S_0$ , получим:

$$S=S_0+\delta S+1/2\delta^2S \quad (4)$$

где  $S_0$  - максимальное значение функции  $S$  в равновесном состоянии, поэтому член первого порядка  $\delta S$  обращается в ноль. Равновесным является такое состояние, когда система регенерации не работает и разделение и накопление шлама не происходит. Устойчивость системы определяется знаком члена второго порядка

$\delta^2 S$ . В равновесном состоянии приращение производной второго порядка равно нулю, энтропия максимальна. В неравновесном состоянии это приращение больше нуля, производство энтропии больше нуля. В стационарном состоянии приращение производной второго порядка минимально, производство энтропии равно нулю, т.е. система не реагирует на флуктуации. В неравновесном состоянии система работает в переходном режиме, флуктуациями могут быть перегруз или отключение аппарата, резкое изменение состава питания и т.д.

Анализ установившегося режима работы схемы позволяет заключить:

1) работа системы осветления тем эффективнее, чем меньше значение приращения энтропии за счет внутренних процессов; 2) в производство энтропии основной вклад вносят такие процессы как истирание шлама и размокание глинистых пород, т.е. процессы производства дополнительного количества тонкого шлама; 3) одним из процессов, оказывающих наиболее

сильное влияние на производство энтропии, является циркуляция потоков и объединение ранее разделенных продуктов; 4) дополнительное производство шлама можно свести к минимуму, управляя термодинамическими силами системы и потоками шлама; 5) основными технологическими факторами, с помощью которых можно управлять термодинамическими параметрами, являются концентрация шлама в потоках и интенсивность выведения шлама отдельными аппаратами и системой в целом.

Уравнение материального баланса открытой термодинамической системы как единого целого можно записать дифференциальным уравнением :

$$dC / dt = - KC + q (C_0 - C) / V, \quad (5)$$

где  $C$  - концентрация шлама в единице объема пульпы;  $t$  - время работы системы;  $K$  - параметр скорости выведения шлама, численно равный скорости выведения при единичной концентрации;  $q$  - объемная скорость подачи шлама;  $C_0$  - начальная концентрация шлама (концентрация шлама за первый оборотный цикл);  $V$  - объем аппаратов системы осветления.

В результате решения уравнения (5) при заданных начальных условиях получено выражение для безразмерной скорости  $v$  поступления шлама в систему:

$$v = q / KV, \quad (6)$$

Единственный эффективный путь улучшения работы системы осветления - увеличивать параметр  $K$ . То есть повышать интенсивность выведения шлама из системы, которая, как показал термодинамический анализ, зависит и от ее построения. Оптимальное распределение потоков и топология системы осветления в целом при существующем наборе оборудования является одним из эффективных путей повышения качества ее работы за счет снижения производства энтропии благодаря увеличению интенсивности выведения шлама из системы.

Из проведенных теоретических исследований вытекает, что необходимо снижать приращение энтропии в системе путем управления ее термодинамическими силами и потоками, повышения интенсивности

выведения шламов из системы. Этот важный практический вывод открывает возможности повышения эффективности работы действующих систем освещения без капитальных вложений, что актуально в современной экономической ситуации. Для анализа и прогнозирования работы систем необходимо иметь модель, учитывающую полученные теоретические закономерности.

В главе 3 разработана гибкая модель накопления шламов и алгоритм метода для компьютерного моделирования работы систем освещения, в основу которых положена модель элементарного разделения и накопления шламов (рис. 3). Узел У распределяет введенную порцию шлама  $q_{i-1}$  в выходящие потоки  $q_i^1$ ,  $q_i^2$  и т.д. Так, для двух потоков (например, для гидроциклона) имеем:

тонкий шлам	зернистый шлам	
$q_{i1}^1 = q_{i-1}(1-\varepsilon)$ ,	$q_{i2}^1 = q_{i-1}(1-\eta)$ ,	(7)

$q_{i1}^2 = q_{i-1}\varepsilon$ ,	$q_{i2}^2 = q_{i-1}\eta$ ,	(8)
-----------------------------------	----------------------------	-----

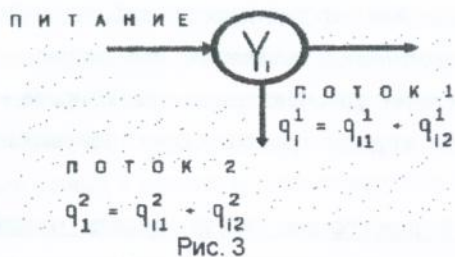
где  $\varepsilon$  и  $\eta$  - коэффициенты распределения тонкого и зернистого шлама.

Модель отвечает требованиям материального баланса и одновременно описывает термодинамику работы системы освещения, что выполняется выбором коэффициентов разделения, которые зависят от конструкции аппарата и способа его действия, настройки, содержания глинистых минералов, периода обработки шлама и т.п.

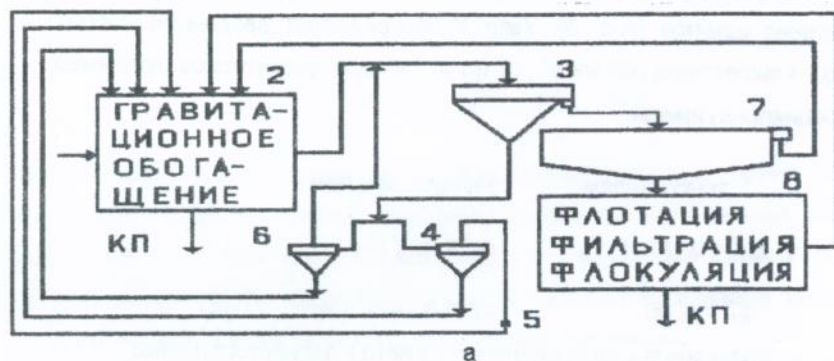
Процесс накопления и выведения шлама является циклическим, когда входящая порция шлама разделяется, преобразуется, обрабатывается всеми узлами определенный период времени. После чего может быть рассмотрена следующая порция шлама. Кроме того, работа последующего узла определяется работой предыдущего. Наиболее удобно такие процессы моделируются численными итерационными методами и теорией графов.

Система освещения оборотной воды (рис. 4, а) представляет собой неполный антисимметрический ориентированный мультиграф (рис. 4,б), т.к. каждая вершина (узел) не соединена со всеми другими; не все вершины

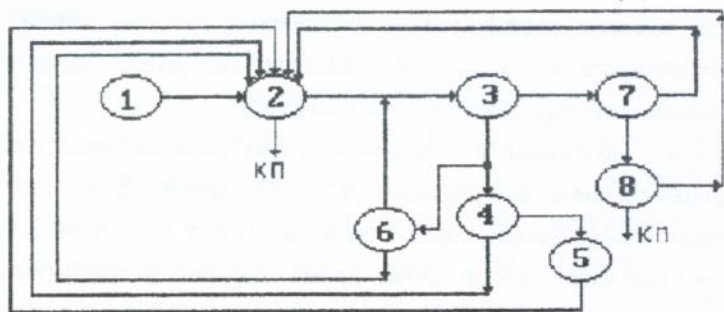
### Модель узла системы освещения



### Действующая система освещения ЦОФ "Чумаковская"



### Итерационный граф для системы



1-поступление рядового угля, 2-8 – номера узлов

Рис. 4

имеют связи в прямом и обратном направлениях; все ребра ориентированы и являются дугами (роль дуг выполняют однозначно направленные трубопроводы); пары вершин часто соединены более, чем одной дугой. Путь в графе системы простой, т.к. по каждой дуге проходят один раз. Именно простые пути в графе системы освещения представляют наибольший интерес с технической точки зрения, т.к. они позволяют проследить кинетику движения и накопления шламов. В качестве весов дуг автором предложено использовать коэффициенты распределения шлама узлами. Анализ системы освещения базируется на выделении Эйлеровых (простых) путей на ее графе.

В работе для описания графа системы освещения применен алгоритм построения независимых маршрутов (алгоритм Цоя), основанный на выборе их из общего числа маршрутов и модифицированный нами применительно к простым маршрутам. Такая формализация системы дала возможность анализировать схемы любой сложности и любых типов, независимо от конкретного их построения. Это выгодно отличает данный алгоритм моделирования систем освещения от известных методов, оценивающих работу системы либо только интегрально либо связанных с конкретным вариантом построения схемы.

В итоге реальная сложная система освещения может набираться из элементарных ячеек, построенных на основе элементарной модели накопления и принципах теории графов (сравн. рис. 3 и 4,б). Численная модель системы освещения учитывает все основные закономерности процесса накопления шламов в оборотной воде - материальный баланс по количеству шлама, концентрацию шлама во всех узлах через коэффициенты распределения шлама аппаратами, интенсивность выведения шлама, производство энтропии. При этом производство энтропии учитывается от всех основных причин, установленных в термодинамическом анализе, а именно: 1) производство тонкого шлама - перераспределением коэффициентов в пределах одного узла; 2) накопление и выведение шлама - значениями коэффициентов и взаимосвязью узлов; 3) скорость накопления и выведения - поцикловым итерационным моделированием, а также учетом

конкретной длительности потоков; 4) производство энтропии за счет объединения потоков учитывается взаимосвязью элементов.

Основными параметрами, используемыми при моделировании процессов, происходящих в системах осветления оборотных вод углеобогатительных фабрик, являются коэффициенты распределения тонкого и зернистого шлама (извлечения) аппаратами этих схем. Поэтому необходимо определить в каких пределах изменяются эти параметры при работе схемы в замкнутом цикле. Наиболее часто для обработки шламовых вод используются радиальные сгустители и гидроциклоны. Исследования для радиальных сгустителей в лабораторных и промышленных условиях показали, что в диапазоне изменения плотности питания лабораторного сгустителя от 32,7 до 52,8 кг/м<sup>3</sup> извлечение тонких классов в слив возрастает с 0,32 до 0,63 (при работе с циркуляцией слива). Извлечение крупных частиц в сгущенный продукт в это же время снижается с 0,87 до 0,60. Для промышленного сгустителя при изменении плотности питания в диапазоне от 50 до 250 кг/м<sup>3</sup> при удельной нагрузке от 0,75 до 4,5 м<sup>3</sup>ч.м<sup>2</sup> (ЦОФ "Краснолиманская") наблюдается повышение извлечения частиц крупностью <0,5 мм в слив с 0,42-0,57 до 0,68-0,82 (рис. 5). При увеличении плотности питания извлечение тонких шламов в слив радиального сгустителя увеличивается, а зернистых в сгущенный продукт уменьшается. В лабораторных условиях для гидроциклонов получена аналогичная зависимость (рис. 6). Сепарационные характеристики для радиального сгустителя свидетельствуют о том, что при увеличении содержания в питании классов <0,045 мм от 86 до 91% происходит увеличение граничной крупности разделения от 0,02 до 0,11 мм и средневероятного отклонения от 0,06 до 0,1 мм. На основании полученных сепарационных характеристик для лабораторного гидроциклона установлено, что граничная крупность разделения увеличивается от 0,19 до 0,14 мм, а среднее вероятное отклонение – от 0,58 до 0,63 мм при увеличении содержания тонких частиц в питании. Путем статистической обработки получены количественные зависимости между значениями исследовавшихся параметров. Учет этих закономерностей позволяет обоснованно принимать значения

Извлечение класса <0.5 мм в слив промышленного радиального сгустителя

$$y = .42940 + .00124 * x$$

Correlation:  $r = .90383$

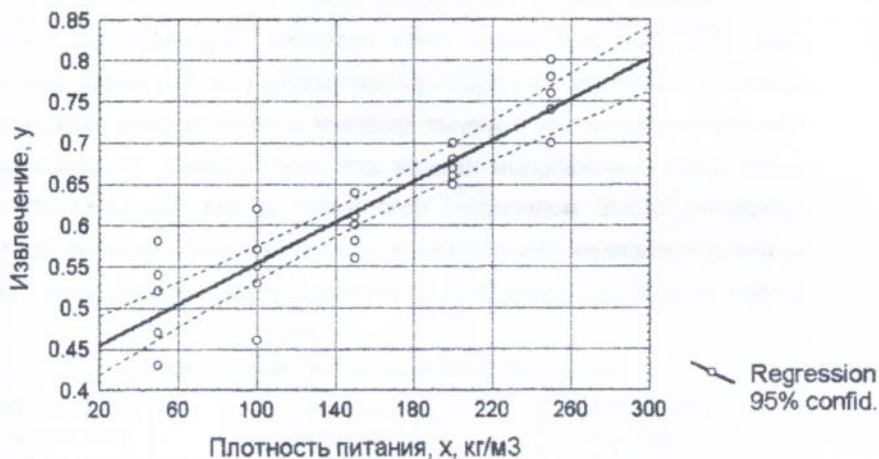


Рис. 5

Извлечение класса <0.3 мм в слив гидроциклона

$$y = 37.243 + .03169 * x$$

Correlation:  $r = .72660$

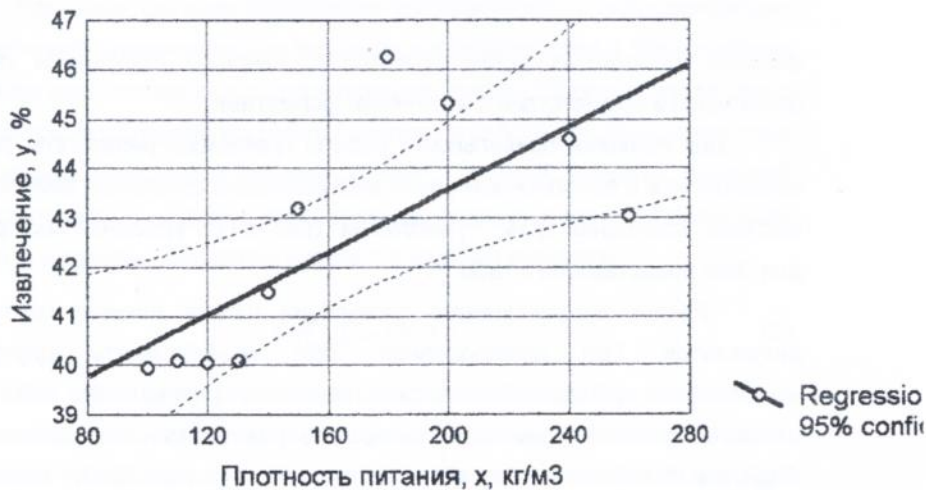


Рис.6

коэффициентов разделения шлама в потоках, что гарантирует достаточную точность и достоверность результатов моделирования.

Анализ работы систем освещения автоматизирован с помощью ЭВМ. Для этого был создан пакет программ, моделирующий накопление шлама. В состав пакета входят три программы (рис.7). Первая программа - "Регистратор-хранитель"- хранит фабрики и номера схем. Каждая схема имеет файл с уникальным именем для ввода данных. Основная рабочая программа *SLIME* моделирует накопление шлама. Пользователь задает количество итераций. Вычисления выполняются в цикле сначала для тонкого шлама, а затем для зернистого. Количество шлама, поступающего в систему

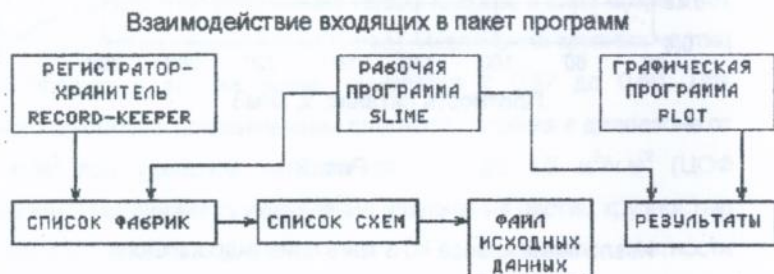


Рис.7

фабрики с рядовым углем принято за единицу. Результаты расчета печатаются в соответствии с заданными форматами.

Для проверки правильности работы программы результаты расчета сравнивались с выполненным ранее аналитическим описанием действующей системы освещения ЦОФ "Чумаковская" (рис. 4а,б). Исходная информация для ЭВМ представлена в табл. 1.

Расчет коэффициентов циркуляции шлама показал совпадение результатов. При использовании ЭВМ коэффициенты циркуляции вычисляются программой непосредственно по соотношению количества шлама в потоках, определяющих возвраты в гравитационное отделение на  $N$ -м цикле и на первом цикле работы системы:  $K=Q/Q_1$ , где  $Q$ ,  $Q_1$  - количество шлама в указанных потоках на  $N$ -м и первом цикле работы системы,

соответственно, в долях единицы; определяются на основании расчетов, проведенных программой.

Таблица 1

Исходные данные для работы программы *SLIME* по ЦОФ "Чумаковская"

$ko(j)$	$k1(j)$	$e1(j)$	$e2(j)$	$INR$
1	2	1.0	1.0	1
2	3	0.8	0.7	6
3	4	0.1125	0.4325	3
4	2	0.5630	0.97	2
4	5	0.4370	0.03	2
5	2	1.0	1.0	5
3	6	0.1125	0.4325	4
6	2	0.588	1.0	1
6	3	0.4120	0.0	2
3	7	0.775	0.135	3
7	2	0.627	0.0	6
7	8	0.373	1.0	16

Любое число фабрик и схем может быть моделировано. После анализа результаты обрабатываются программой "График", в которой пользователь выбирает номера узлов любой схемы и фабрики. Это позволяет сравнивать работу различных схем и фабрик, аппаратов на любом цикле, что увеличивает эффективность анализа.

Реальные системы освещения характеризуются инерционностью, обусловленной инерционностью входящих в нее аппаратов и транспортным запаздыванием, связанным с разветвлением схемы. С целью учета этого свойства при моделировании работы системы в работе под инерционностью всей системы понимается показатель  $INR$ , который является функцией скорости потока  $V_s$ , длины ветви (или расстояния между соединенными узлами)  $L_s$  и времени обработки шлама  $T$  в узловом аппарате:

$$INR = (L_s / V_s + T) \quad (9)$$

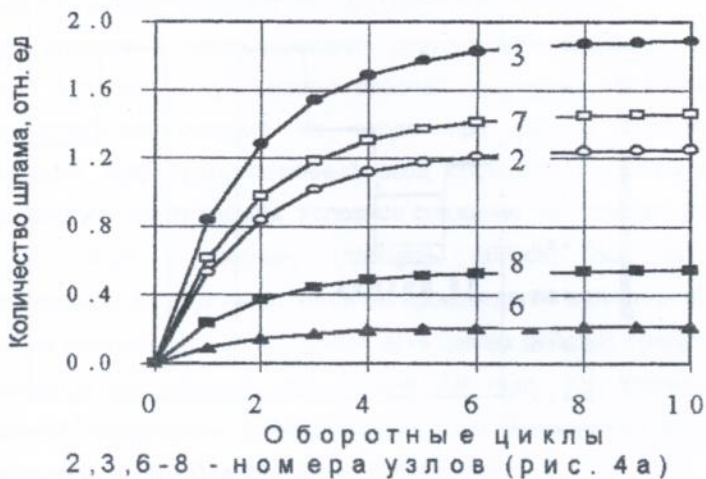
Для учета инерции звеньев длительность потоков вводилась в исходные данные (табл. 1), полученные на основании опробования. Накопление тонкого шлама в различных потоках действующей системы ЦОФ "Чумаковская" без учета и с учетом инерционности различных ветвей

представлено на рис. 8. Сравнение рис. 8а и 8б показывает, что конечное количество шлама одинаково в обоих случаях, что еще раз подтверждает корректность составленной вычислительной программы. При стохастическом вводе питания в систему установлено, что при его колебаниях в пределах  $\pm 15\%$  содержание шлама во всех потоках увеличивается от 2 до 35%. При этом в системе осветления оборотных вод производство энтропии увеличилось за счет увеличения производства шлама из-за циркуляции потоков и снижения скорости выведения шламов из системы.

Возникающие в замкнутой системе предприятия автоколебательные процессы могут быть искусственно усилены или подавлены путем регулирования соединенных аппаратов, координированием их действия, подбором длины и диаметра трубопроводов. Бывает необходимо подавлять автоколебательные процессы, чтобы добиться стабильной работы оборудования. С помощью разработанной модели легко исследовать возможные последствия такого регулирования и выбрать рациональный вариант. Полученные результаты подтверждаются независимыми измерениями колебаний содержания шлама в действующих системах реальных фабрик (рис. 9б). Концентрические кривые представляют время  $T$  (или циклы работы), радиальные - содержание шлама ( $\text{г/дм}^3$ ). Можно видеть 4 падения содержания шлама в действующем отделении флотации, а именно в моменты А, В, С и D. Падение в точках С и D имеет место после стабилизации содержания шлама. По отношению к исходному ( $70 \text{ г/дм}^3$ ), в точках С и D оно составляет около  $1,75\text{-}1,96 \text{ г/дм}^3$  или  $0,025\text{-}0,028$  в относительных единицах. Падение содержания шлама в точке, соответствующей моменту D на рассчитанной с помощью модели кривой (рис. 9а) равняется  $0,031$ . Это значение близко к измеренному, что подтверждает надежность разработанной модели.

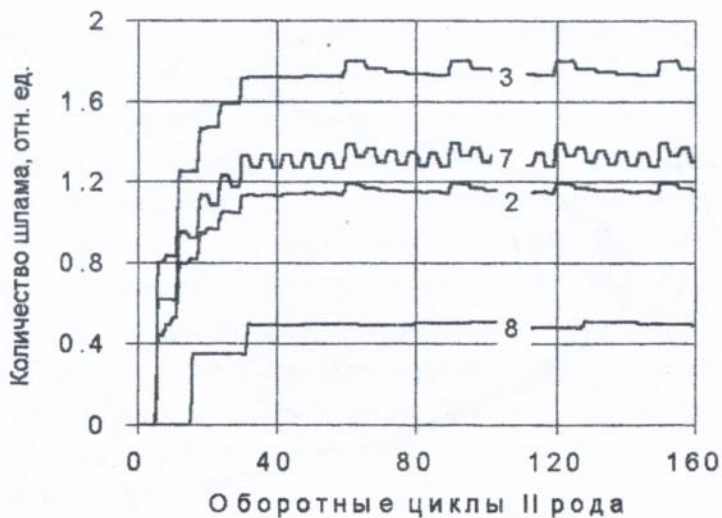
Автоколебательные процессы являются естественными и закономерными, т.к. открытые термодинамические системы приходят к состоянию самоорганизации, когда они пропускают через себя поток вещества или энергии значительной интенсивности. Снижение количества

## Накопление тонкого шлама в питании узлов действующей системы



а

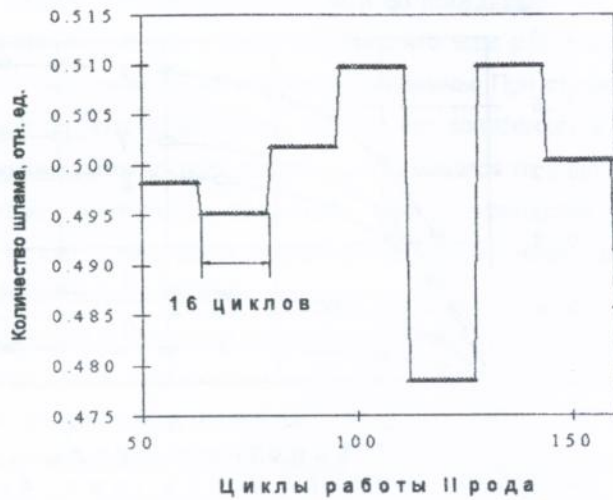
## Колебания количества шлама в питании узлов с учетом инерционности



б

Рис.8

Колебания количества тонкого шлама в питании узла 8 (флотация)



а  
Колебания содержания шлама в питании отделения флотации  
б

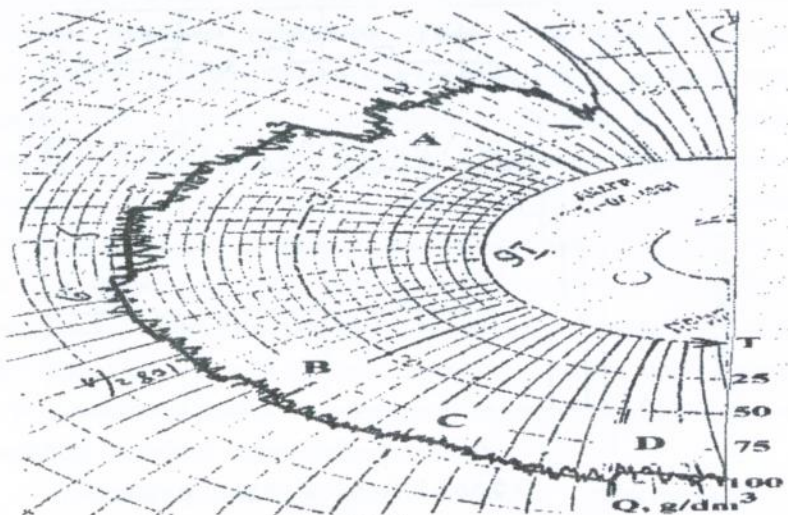


Рис.9

шламов в системе может быть достигнуто и другим способом – путем уменьшения поступления шлама в систему осветления на входе.

Для анализа и прогнозирования результатов воздействия таких мероприятий был разработан вариант рабочей программы, позволяющий учитывать колебания питания на входе при работе системы и обеспечивающий дифференцированный ввод определенного количества шламов по каждому циклу работы. Условное снижение поступления (сброс) питания на входе в систему (площадь сброса)  $\Delta Q$  при его детерминированном вводе определяется как произведение величины сброса питания  $\Delta F$  на длительность этого сброса  $\Delta t$  (в циклах работы). Графически  $\Delta Q$  выражается как площадь под линией АВ (рис. 10). Установлена количественная зависимость, показывающая, что с увеличением площади сброса снижение относительного количества шламов в оборотной воды возрастает. При этом не имеет значения, каким путем достигается определенная величина площади сброса – за счет амплитуды сброса или его длительности, рис. 10. При работе действующих систем можно добиваться самоочищения оборотной воды, снижая поступление питания на входе различными приемлемыми в данных условиях методами с учетом технологических, организационных и других ограничений.

В главе 4 приведены детальный анализ и оценка работы действующих систем осветления оборотных вод с помощью разработанного метода моделирования для ЦОФ “Чумаковская”, “Горловская”, “Никитовская”, “Пролетарская”, “Узловская”, “Луганская”, “Червоноградская” и ряда других, который позволил выявить отрицательные элементы в построении систем этих фабрик и наметить пути их совершенствования, изменяя построения схем без значительных капитальных затрат. Системы осветления этих предприятий являются наиболее типичными и широко распространенными. Новые решения были получены благодаря разработанной модели, которая впервые обеспечила возможность дифференцированного анализа схем по любым узлам, потокам и циклам работы.

Преимущества разработанного метода моделирования ярко демонстрируются на примере анализа работы сложной системы осветления

Влияние площади сброса питания на количество шлама в оборотной воде



Циклы работы

Рис. 10

Действующая система осветления оборотных вод ЦОФ "Луганская"

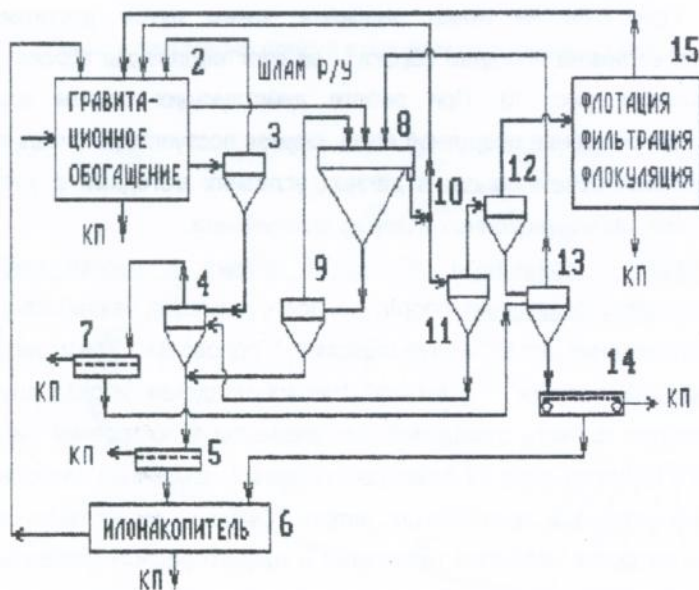


Рис. 11

ЦОФ "Луганская". Интегральная оценка ее не дает результатов. Только поузловой анализ позволил выявить причины значительного накопления шламов и наметить пути ее совершенствования. Так, было установлено, что накопление тонкого шлама в питании гидроклассификатора (узел 8, рис. 11) полностью определяется потоком 2-8 из гравитационного отделения. 98% тонких частиц питания идут в его слив. 56% зернистого шлама из питания также поступает в слив. Т.е. зернистый шлам между продуктами классификатора распределяется примерно поровну. При этом 89% зернистого шлама, уходящего в сгущенный продукт аппарата, снова возвращается в него в виде слива гидроциклона ГЦО-350 (поток 9-8). Фактически, из гидроклассификатора выводится только четвертая часть поступающего зернистого шлама. По зернистому шламу этот узел перегружен. Для снижения циркуляции этого шлама необходимо вывести слив гидроциклонов ГЦО-350 из него (поток 9-8) и направить его в гидроциклоны ГЦ-1000 (узел 11).

Данные обследования фабрик показывают, что содержание тонкого шлама в подрешетных водах колеблется от 53,2 (ЦОФ "Никитовская") до 88,8% (ЦОФ "Горловская") с зольностью 18,0-28,7%. Содержание зернистого шлама находится в пределах от 11,2 (ЦОФ "Горловская") до 46,8% (ЦОФ "Никитовская") с зольностью 7,7-15,5%. Только ЦОФ "Луганская" выходит за пределы этих цифр, что связано с наличием размокаемых пород и малоэффективной работой процесса флотации, и имеет зольность первичного шлама 57 и вторичного - 38,5%. Максимально накопление зернистого шлама в оборотной воде ЦОФ "Никитовская", что связано с неэффективной работой системы осветления и перегрузкой радиального сгустителя. В целом накопление зернистого шлама в системе в 2 - 15 раз меньше, чем тонкого для обследованных предприятий.

По результатам исследований и расчетов определены интенсивность выведения и накопления шламов в системе (табл. 2). Интенсивность выведения шлама определялась по зависимости:

$$V_i = Q_r / Q_e, \quad (10)$$

где  $Q_r$ ,  $Q_e$  - выведение с конечными продуктами из системы осветления и поступление шлама в систему на определенном цикле работы, соответственно, отн. ед.

Интенсивность накопления шламов в системе определялась из соотношения:

$$V_a = Q_s / Q_e, \quad (11)$$

где  $Q_s$  - количество шлама в системе на определенном цикле работы, отн.ед.

Максимальную интенсивность выведения шлама - 0,56-обеспечивает двухпоточная система осветления ЦОФ "Узловская" при поступлении шлама 1,23 отн. ед. Наибольшее поступление шлама имеет ЦОФ "Никитовская" при использовании гидроциклонов - 2,43 (см. табл. 2). Только при работе системы осветления этой фабрики интенсивность выведения тонкого шлама снижается от 1 до N-ного цикла, что связано с плохой регулировкой потоков.

Об этом свидетельствует и то, что ЦОФ "Никитовская" и ЦОФ "Горловская" имеют системы, близкие по построению и аппаратурному оснащению. Однако их работа отличается разительно. Основная масса тонкого шлама поступает в оборотную воду ЦОФ "Никитовская" вместе со сливом радиального сгустителя, который в сложившейся ситуации работает плохо. 77% частиц крупностью менее 0,5 мм, поступающих в этот аппарат с питанием, попадают в его слив и направляются в бак оборотной воды. Зернистый шлам накапливается от возврата половины сгущенного продукта пирамидальных отстойников на мокрую классификацию.

На ЦОФ "Горловская" извлечение тонкого шлама в слив радиального сгустителя на 16% (абсолютных) меньше. Кроме того, сгущенный продукт гидроклассификатора выводится из системы. Система осветления ЦОФ "Горловская" работает лучше, так как имеет другое распределение потоков и большую интенсивность выведения шлама. Это еще раз подтверждает теоретические выводы о возможности значительного улучшения работы систем осветления оборотных вод без капитальных вложений.

Таблица 2

Накопление тонкого шлама и интенсивность его выведения из системы						
Фабрика	Цикл работы	Шлам, отн. ед.			Интенсивность	
		Поступление	выведение	в системе	накопления	Выведения
Кальмиусская	1	0.8	0.1769	0.6231	0.78	0.22
	2	1.2453	0.2899	0.9554	0.77	0.23
	N	2.0141	0.4853	1.5288	0.76	0.24
Чумаковская	1	0.8	0.2313	0.5687	0.71	0.29
	2	1.2253	0.3649	0.8604	0.70	0.30
	N	1.7626	0.5457	1.2550	0.68	0.32
Луганская	1	0.8	0.1977	0.6023	0.75	0.25
	2	1.1906	0.3464	0.8532	0.71	0.29
	N	1.6177	0.5060	1.1117	0.65	0.35
Пролетарская I секция	1	0.8	0.1783	0.6217	0.78	0.22
	2	1.0377	0.2804	0.7573	0.73	0.27
	N	1.3955	0.5443	0.8512	0.61	0.39
Пролетарская II секция	1	0.8	0.2306	0.5694	0.71	0.29
	2	1.0210	0.3764	0.6446	0.63	0.37
	N	1.4111	0.5504	0.8607	0.61	0.39
Узловская	1	0.8	0.3769	0.4231	0.53	0.47
	2	1.0471	0.5550	0.4921	0.47	0.53
	N	1.2320	0.6919	0.5404	0.44	0.56
Горловская 1-поточная	1	0.8	0.1752	0.6248	0.78	0.22
	2	1.0462	0.3157	0.7305	0.70	0.30
	N	1.6287	0.5906	1.0381	0.64	0.36
Горловская 2-поточная	1	0.8	0.0265	0.7735	0.97	0.03
	2	0.8372	0.2262	0.6110	0.73	0.27
	3	1.1179	0.5161	0.6018	0.54	0.46
	N	1.6057	0.5835	1.0322	0.64	0.36
Никитовская (РС)	1	0.8	0.1688	0.6312	0.79	0.21
	2	1.1751	0.3008	0.8743	0.74	0.26
	N	1.8245	0.5316	1.2929	0.71	0.29
Никитовская (ГЦ)	1	0.8	0.1885	0.6115	0.76	0.24
	2	1.1799	0.2554	0.9245	0.78	0.22
	N	2.1430	0.4522	1.6908	0.79	0.21

Для обследованных фабрик количество тонкого шлама в питании узла улавливания (отстойники, гидроклассификаторы, гидроциклоны) превышает его количество в оборотной воде в 1,3-2,4 раза, а зернистого шлама - в 3-3,5. Коэффициенты циркуляции шлама в указанных потоках близки.

Численный анализ подтвердил результаты термодинамического по следующему положению: накопление шламов в оборотной воде

определяется не только количеством циркулирующих потоков, но зависит от точки, в которую возвращается данный поток в гравитационное отделение, а также от характеристик работы узлов улавливания (от коэффициентов распределения).

Гранулометрический состав питания операции мокрой классификации свидетельствует о том, что накопление и циркуляция шламов в системе не зависят от количества класса менее 0,5 мм, поступающего с рядовым углем. Этот фактор скорее влияет на объем аппаратов системы осветления, необходимых для его обработки. Таким образом, даже при размокаемых породах возможна эффективная работа системы, если она спроектирована должным образом и выбран оптимальный для данных условий вариант ее построения.

Накопление происходит в схемах, где в оборот направляется слив гидроциклонов (ЦОФ "Луганская", "Никитовская"), так как этот поток содержит значительное количество шламов.

Интенсивность выведения шламов возрастает от первого до N-ного цикла работы, за исключением тех фабрик, где произошло значительное накопление шламов в системе (ЦОФ "Никитовская"), когда система фабрики вышла из стабильного режима и не выполняет своих функций.

Количество шлама после многократного использования оборотной воды в замкнутом цикле больше при использовании однопоточных систем осветления. Поэтому следует рекомендовать переходить на работу двухпоточными системами.

Необходимо совершенствовать системы осветления в направлении увеличения интенсивности выведения шламов из системы. Автором впервые установлены критические значения этого показателя. При низкой интенсивности (0,2-0,3) система работает неудовлетворительно, при средней (0,3-0,4) - работу можно считать удовлетворительной, при более высокой интенсивности (0,4-0,5 и более) - система обеспечивает необходимый уровень регенерации оборотных вод.

Циркулирующие потоки приводят к значительному накоплению шлама в системе и являются отрицательным элементом построения систем освещения.

Правильный выбор топологии системы регенерации оборотной воды - один из основных способов управления накоплением тонких шламов на фабриках и снижения загрязнения окружающей среды.

При решении задачи оптимизации топологии систем освещения в работе используется приближенный метод с применением эвристических подходов, в которых случайный поиск сочетается с идеей локальной оптимизации. При этом был применен метод "ветвей и границ" при нахождении минимума целевой функции, которой является минимум производства энтропии в системе. Физический эквивалент этой функции представлен относительным количеством шлама в оборотной воде, а также в других потоках системы освещения. На основе теории управления большими системами разработана иерархия поиска оптимального решения.

В главе 5 исходя из проведенных исследований разработаны основные принципы совершенствования систем освещения. Как было теоретически установлено и подтверждено экспериментально, главными направлениями следует рассматривать увеличение интенсивности выведения шлама и уменьшение производства энтропии. Численное моделирование показало, что скорость выведения шлама можно повышать как разработкой оптимальной топологии систем освещения из уже существующих узлов, так и совершенствуя отдельные ее элементы (аппаратные средства), см. рис. 12.

Увеличение интенсивности выведения шламов из системы достигается путем изменения поточности схемы (ЦОФ "Чумаковская"), подбора оптимального сочетания уже имеющихся в схеме аппаратов и взаимосвязи их (перекомпоновка потоков, ЦОФ "Узловская", "Луганская"). Управляя термодинамическими силами и потоками в аппаратах также можно добиться значительного повышения интенсивности выведения шламов. Для этого разработаны технические решения, увеличивающие центробежные силы, действующие на частицы шлама и снижающие силы трения (а.с.

1437094). Уменьшение производства энтропии в системе достигается управлением термодинамическими потоками системы и изменением ее построения. Для этого необходимо поддерживать оптимальными циркуляцию шлама и инерционность системы, устранять слияние разделенных ранее потоков, находить оптимальное сочетание потоков разной крупности, не допускать увеличения коэффициента циркуляции шлама более 1,3-1,5.

Для управления термодинамическими потоками системы разработаны технические решения по определению коэффициента циркуляции шламов (а.с. 1608485), по поддержанию оптимальной циркуляции и инерционности системы (а.с. 1487992). Способ определения показателя циркуляции шлама в системе освещения отличается от известных тем, что показатели разделения, накопления и производства шлама определяются в каждом узле схемы. Именно этот подход оценивает накопление шламов как дифференцированно, так и интегрально. Способ регулирования водно-шламовых процессов углеобогащения (а.с. 1487992) основан на измерении массы шлама в питании и образующейся в процессе обработки его в системе, массы накопленного шлама в оборотной воде в установившемся режиме работы системы. По измеренным параметрам определяют показатель циркуляции шлама. Длительность одного оборотного цикла измеряют по изменению содержания твердого на выходе системы. Инерционность системы определяют по соотношению длительности стабилизации содержания твердого в оборотной воде к длительности одного оборотного цикла и поддерживают ее в пределах 6-10 циклов оборота оборотной воды путем регулирования расхода питания системы. В новый способ заложены основные принципы регулирования систем освещения, предусматривающие оптимизацию ее топологии с целью снижения производства шлама. В сочетании с разработанным автором численным методом моделирования этот способ позволяет оперативно выбрать рациональную систему освещения с оптимальным сочетанием узлов и потоков.

Очень важно, что оптимизация осуществляется на базе серийного оборудования и, как правило, не требует капитальных затрат. Эти

## Направления совершенствования систем осветления углеобогатительных фабрик

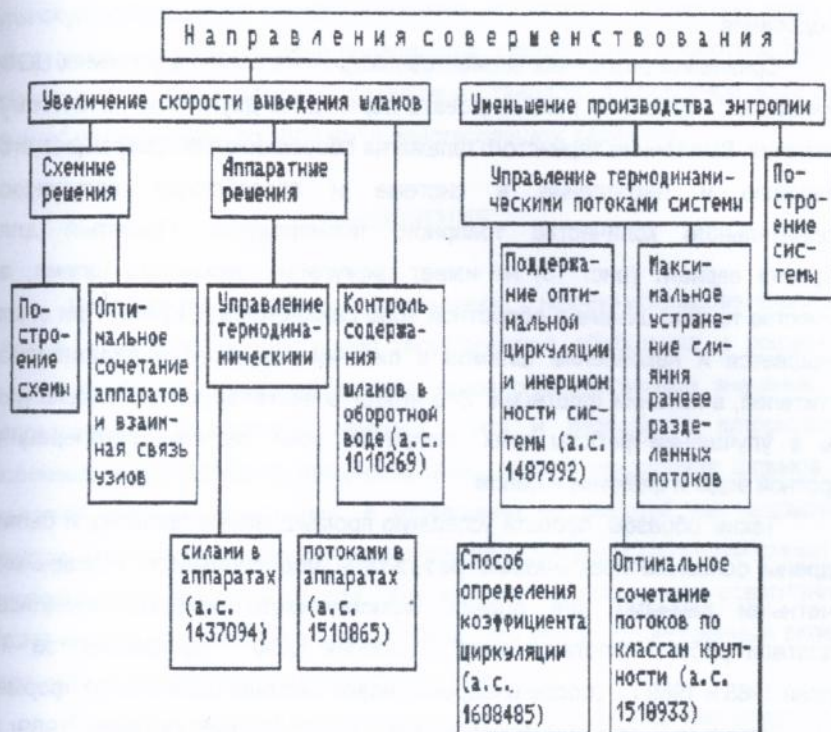


Рис. 12

## Система осветления оборотных вод ЦОФ "Чумаковская" (внедренный вариант)

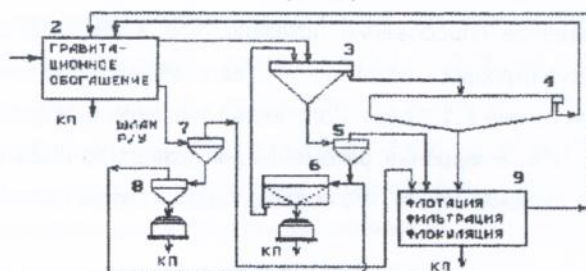


Рис. 13

технические решения направлены на уменьшение производства энтропии в замкнутой системе, что опирается на проведенные теоретические исследования.

Сравнение различных вариантов построения схемы в условиях ЦОФ "Чумаковская" позволило рекомендовать переход на двухпоточную систему осветления. Выведение зернистого шлама на обезвоживание прекращает его циркуляцию и накопление в системе и способствует получению дополнительного количества товарного промпродукта. Принятый для внедрения вариант (рис. 13) не имеет циркуляции зернистого шлама, а количество тонкого шлама в оборотной воде снижается в 8,3 раза. При этом уменьшается и накопление шламов в питании конусного и радиального сгустителей, в питании флотации. Это играет значительную положительную роль в улучшении работы этих аппаратов, всей системы регенерации оборотной воды и фабрики в целом.

Таким образом, прошли успешную промышленную проверку и были внедрены основные практические результаты моделирования. Исходными расчетными данными для оценки экономического эффекта являлись показатели работы флотационного отделения ЦОФ "Чумаковская" за III квартал 1988 и 1989 г.г. (после внедрения новой системы осветления), форма 30-ТП. Полученный экономический эффект 123.5 тыс. руб. (в ценах 1989г.) зарегистрирован в ЦСУ СССР по форме 4НТ.

На ЦОФ "Пролетарская" были внедрены разработанные рекомендации по совершенствованию системы осветления оборотной воды. При этом проведенное опробование показало, что в системе снижается количество циркулирующих потоков и увеличивается интенсивность выведения шлама из нее в 1,2 раза. Количество твердого в оборотной воде уменьшилось на 15%. Внедрение рекомендаций позволило снизить потери горючей массы с отходами на 2%, что подтверждается актом промышленных испытаний.

Для совершенствования работы действующей системы осветления ЦОФ "Луганская" необходимо: исключить циркуляцию зернистого шлама и разгрузить от него гидроклассификатор; увеличить интенсивность выведения

тонкого шлама из системы; снизить количество стадий обработки шлама. С учетом разработанных рекомендаций сотрудниками ЦОФ "Луганская" и ПО "Луганскуглеобогащение" изменена система регенерации оборотной воды с учетом реальных возможностей предприятия. Опробование оборотной воды фабрики подтвердило снижение содержания твердого в оборотной воде до  $110 \text{ кг/м}^3$  по сравнению со  $180 \text{ кг/м}^3$  в действовавшем варианте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой осуществлено теоретическое обобщение и решение научной проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение и заключающееся в развитии научных основ и разработке алгоритмов численного моделирования процессов циркуляции и накопления шламов в замкнутой системе осветления, в управлении ее работой как открытой термодинамической системы путем выбора рациональной топологии схемы и перераспределения потоков для обеспечения эффективного осветления оборотных вод углеобогатительных фабрик. Это вносит существенный вклад в повышение эффективности углеобогащения.

Основные научные и прикладные результаты работы заключаются в следующем:

1. Рассмотрение и анализ работы системы осветления оборотных вод исходя из фундаментальных положений термодинамики необратимых процессов как термодинамически открытой системы впервые позволило определить качественный уровень работы системы осветления ее вероятностным состоянием, мерой которого является величина энтропии. При этом дополнительно образующийся тонкий шлам в системе за счет внутренних процессов, циркуляций, объединения ранее разделенных потоков и стохастических флуктуаций питания на входе является причиной увеличения энтропии системы или ее производства.
2. Управление работой системы (уменьшение производства энтропии) может осуществляться регулированием термодинамических

потоков и сил системы. При этом основными управляемыми технологическими факторами являются концентрация шлама в потоках и интенсивность его выведения из системы в целом.

3 Впервые доказана возможность снижения концентрации шлама в оборотной воде путем искусственного сброса питания на входе в систему. При этом установлена прямая количественная зависимость между площадью сброса питания и снижением количества шлама в оборотной воде, которая показывает, что не имеет значения, каким путем достигается определенная величина площади сброса – длительностью сброса или амплитудой.

4. Впервые предложено оценивать качество работы системы осветления показателем интенсивности выведения из нее шлама, который представляет собой отношение количества выводимого шлама к количеству шлама в системе на любом цикле работы и зависит от топологии системы и количественного перераспределения потоков. При этом установлено, что эффективная работа системы обеспечивается при значениях этого показателя 0.4-0.5.

5. Разработана новая численная модель имитационного моделирования процессов разделения, накопления и перераспределения шламов в системе, учитывающая переходный и установившийся режимы ее работы и позволяющая прогнозировать работу как системы в целом, так и отдельных ее узлов. Новая численная модель положена в основу пакета программ для персональных компьютеров, позволяющего моделировать накопление шламов и производить табличную или графическую обработку данных для любого числа фабрик, схем и аппаратов на любом цикле работы для любой топологии систем осветления. Это на несколько порядков повысило производительность и достоверность анализа работы систем осветления и впервые обеспечило реальную возможность оперативного управления работой действующих систем и оценки эффективности проектируемых.

6. Разработана иерархия поиска решения по совершенствованию работы системы осветления, включающая принятие критерия оптимизации в виде минимума производства энтропии при работе системы, физическим

эквивалентом которой является относительное количество шлама в оборотной воде, с дальнейшим алгоритмом действий в направлении определения коэффициентов распределения шлама узлами действующей системы, имитационного моделирования ее работы, последующего перераспределения потоков и нахождения рациональной топологии системы. Такое направление действий отличается от существующих подходов и подчиняется принципу "от общего к частному".

7. Экспериментально установлены количественные зависимости увеличения извлечения тонких шламов в слив радиального сгустителя и гидроциклона, уменьшения извлечения зернистых частиц в сгущенный продукт и сдвига сепарационных характеристик в сторону снижения точности разделения при повышении плотности питания и увеличении содержания тонких шламов в нем. Учет этих зависимостей повышает точность и достоверность результатов моделирования.

8. Разработаны новые способы управления системой осветления, базирующиеся на оптимальном сочетании аппаратов и их взаимосвязей, повышении эффективности разделения шламов в центробежном поле (а.с. 1437094), управлении потоками внутри аппаратов (а.с. 1510865), поддержании оптимальной циркуляции потоков системы (а.с. 1487992), оптимальном сочетании потоков по крупности (а.с. 1510933), максимальном устранении сливаний ранее разделенных потоков, а также на способах контроля эффективности работы системы (а.с. 1010269) и определения коэффициента циркуляции (а.с. 1608485).

9. Результаты работы использованы при модернизации системы осветления оборотных вод ЦОФ "Чумаковская", "Пролетарская" объединения Донецкуглеобогащение и "Луганская" объединения "Луганскуглеобогащение". При этом на ЦОФ "Чумаковская" обеспечен реальный экономический эффект 123,5 тыс. рублей в ценах 1989 года (форма ЦСУ 4-НТ), на ЦОФ "Пролетарская" - зольность флотоконцентрата снижена на 0,2% и потери горючей массы с отходами уменьшены на 2%.

Экономический эффект по объединению "Донецкуглеобогащение" по состоянию на начало 1997 г. составляет около 1,2 млн. гривен.

Основные прикладные результаты работы включены в учебное пособие "Проектирование углеобогачительных фабрик" с грифом Минвуза Украины (К.: УМК ВО, 1992.-284с.), и используются при чтении курсов "Проектирование обогащительных фабрик", "Обезвоживание, кондиционирование, очистка сточных и оборотных вод", при выполнении курсовых и дипломных проектов, в научно-исследовательской работе студентов.

Кроме того, разработанный метод моделирования процессов, происходящих в замкнутых технологических системах, может успешно использоваться и в других областях знаний.

Основные научные положения и прикладные результаты работы освещены в следующих публикациях.

1. Системы осветления оборотной воды . В кн.: Проектирование углеобогащительных фабрик / И.И. Зозуля, Е.И. Назимко, Г.В. Самойлик и др. - К.: УМК ВО, 1992. - 284 с. (учебное пособие для вузов).

2. Назимко Е.И. Термодинамический анализ работы водно-шламовой схемы // Изв. вузов. Горный журнал. - 1996. - N1. - С.144-147.

3. Назимко Е.И. Автоматизированный анализ работы систем осветления оборотной воды углеобогащительных фабрик // Обогащение полезных ископаемых. - Киев: Техніка, 1989.- N 39. - С.126-131.

4. Назимко Е.И. Поиск оптимальных вариантов построения водно-шламовых схем углеобогащительных фабрик // Изв. Донецкого горного института.-1995.- N1.-С.79-81.

5. Назимко Е.И. Моделирование процессов накопления шламов в замкнутых системах обогащительных фабрик // Сб. Трудов горно-электромеханического факультета.- Донецк.- 1996. - С.71-74.

6. Зборщик М.П., Назимко Е.И. Управление процессами накопления шламов при осветлении оборотной воды углеобогащительных фабрик // Изв. вузов. Горный журнал. - 1996. - N1. - С.139-143.

7. Nazimko L.I., Nazimko V.V. A Simulation of Slime Circulation and the Effect of Circuit Design // Coal preparation. - 1996. -V 17.- N 3-4. - P.215-232.

8. Зозуля\* Е.И. Влияние условий подготовки пульпы на показатели пенной сепарации // Обогащение полезных ископаемых.-Киев: Техніка, 1980.- N27.-С.30-32.

9. Управление технологической структурой водно-шламовой схемы / М.П.Зборщик, Е.И. Назимко, В.А. Агуреев, В.А. Смирнов // Уголь Украины.- 1994.- N6.-С.49-51.

10. Совершенствование водно-шламовой схемы ЦОФ "Чумаковская" / А.К. Набоков, Б.П. Федотов, В.В. Митлаш, Е.И. Назимко // Уголь Украины. - 1988. - N 2.- С.41-42.

11. Зборщик М.П., Александров С.Н., Назимко Е.И. Влияние структуры водно-шламовой схемы обогатительной фабрики на загрязнение окружающей среды // Изв. Донецкого горного института. - 1995. - N1 - С. 76-78.

12. Назимко Е.И., Дрюченко М.М. Анализ работы водно-шламовой схемы ЦОФ "Никитовская" // Техника и технология переработки мелкозернистых материалов. -Донецк: ЦБНТИ, 1994. - С.1-5.

13. Перспективные направления снижения техногенного воздействия отходов углеобогатительных предприятий на окружающую среду / А.Т. Елишевич, Е.И. Назимко, П.В. Сергеев, В.С. Белецкий // Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-Уральского региона.- Магнитогорск, 1994.-С.63-64.

14. Назимко Е.И., Копылов А.Ф., Александров С.Н. Регенерационный циклический тампонаж вмещающих пород - новый перспективный способ повышения устойчивости горных выработок // Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-Уральского региона.- Магнитогорск, 1994.-С.101-103.

15. Елишевич А.Т., Назимко Е.И., Самылин В.Н. Моделирование технологии извлечения золота из отвалов золотоперерабатывающих фабрик с помощью ЭВМ // Благородные и редкие металлы.-Донецк, 1994.- С.31-32.

16. Ельяшевич М.Г., Зозуля Е.И. Исследование обводненности и кинетики коалесценции двухфазного пенного слоя // Обогащение полезных ископаемых.-Киев: Техніка, 1976.- N20.-С.43-46.

17. Сухин Н.В., Зозуля Е.И. Экспериментальное исследование вязкости двухфазных пен // Обогащение полезных ископаемых.-Киев: Техніка, 1978.- N23.-С.38-40.

18. Ельяшевич М.Г., Зозуля Е.И. Зависимость показателей пенной сепарации от типа и расхода вспенивателей // Обогащение полезных ископаемых.-Киев: Техніка, 1979.- N24.-С.36-38.

19. Зозуля И.И., Штейнберг И.Е., Зозуля Е.И. Методика расчета систем регенерации циркуляционных вод. - Донецк, 1973. - 7с. (Препринт / МУП УССР. ЦБНТИ).

20. Методика расчета систем регенерации оборотной воды / И.Е. Штейнберг, М.Ф. Гольдвассер, Н.П. Лисовенко, В.И. Намлинский, Е.И. Зозуля // ЦНИЭИуголь.- 1974.- 4с.

21. А.с. 1608485 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 N 5/00. Способ определения показателя циркуляции шлама водно-шламовой системы / Б.П. Федотов, Е.И. Назимко, В.В. Назимко.-Опубл. 23.11.90. Бюл. N 43.

22. А.с. 1487992 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 03 В 13/00. Способ регулирования водно-шламовых процессов углеобогащения / В.В. Митлаш, Е.И. Назимко, В.В. Назимко, А.К. Набоков.-Опубл. 23.06.89. Бюл. N 23.

23. А.с. 1510933 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 03 D 1/00. Способ регулирования процесса флотации шламов / Е.И. Назимко, В.В. Митлаш, В.В. Назимко В.В., А.К. Набоков.- Опубл. 30.09.89. Бюл. N43.

24. А.с. 1437094 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 04 С 5/103. Турбоциклон / М.П. Зборщик, В.В. Назимко, Е.И. Назимко. - Опубл. 15.11.88. Бюл. N42.

25. А.с. 1010269 СССР, МКИ<sup>3</sup> Е 21 С 39/00. Способ определения содержания глинистых минералов в горной породе / М.П. Зборщик, В.В. Назимко, В.Л. Самойлов, Е.И. Назимко. - Опубл. 07.04.83. Бюл. N22.

26. А.с. 1510865 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 01 D 21/00. Способ сгущения пульпы / В.В. Назимко, Е.И. Назимко, А.К. Набоков, В.В. Митлаш. - Опубл. 30.09.89. Бюл. N36.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве:  
 1 - главы 2, 3, 5, общее редактирование учебного пособия; 6 - теоретическое обоснование применения теории графов для анализа системы осветления оборотных вод, модифицированный алгоритм построения независимых маршрутов в графе, основные выводы; 7 - теория накопления шламов на основе рассмотрения дифференциального уравнения, численная модель накопления, результаты моделирования накопления, учет флуктуаций питания и инерционности потоков, основные выводы; 9 - новый метод численного моделирования и его применение для анализа накопления шламов на примере ЦОФ "Луганская", основные рекомендации; 10 - вывод уравнений кинетики накопления шламов в потоках, анализ работы системы осветления ЦОФ "Чумаковская", новая схема осветления; 11 - анализ работы системы осветления ЦОФ "Горловская", основные рекомендации; 12 - анализ работы системы осветления ЦОФ "Никитовская", основные рекомендации; 13 - компьютерное моделирование работы систем осветления оборотных вод углеобогатительных фабрик; 14 - компьютерное моделирование циркуляции тампонажного раствора; 15 - компьютерное моделирование технологии извлечения золота из отвалов золотоперерабатывающих фабрик; 16, 17, 18 - проведение и анализ экспериментов по исследованию параметров пенной сепарации как нового способа осветления оборотных вод; 19 - вывод расчетных формул для системы регенерации циркуляционной воды флотацией; 20 - вывод расчетных формул для системы с флотацией слива гидроциклонов; 21, 22, 23, 24, 25, 26 - идея и основные признаки изобретения.

Назимко О.І. "Наукові основи топології систем прояснення оборотних вод вуглезбагачувальних фабрик".

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.08 - "Збагачення корисних копалин", Донецький Державний технічний університет, 1997р.

Захищаються теоретичні основи та розроблені алгоритми численного імітаційного моделювання за допомогою комп'ютерних

103740

технологій процесів циркуляції та накопичення шламів в оборотній воді вуглезбагачувальних фабрик, що дає можливість оцінювати роботу діючих та проектуємих систем прояснення, а також підвищувати ефективність прояснення оборотної води оптимізацією їх топології. Наукові положення опубліковані в 26 наукових працях.

Ключові слова:

вуглезбагачувальна фабрика, система прояснення, оптимізація топології, накопичення шламів, комп'ютерне моделювання.

Nazimko E.I. "Scientific approach to the topology of a clarification system for a coal preparation plant"

Doctor dissertation on speciality 05.15.08. "Mineral processing", Donetsk State Technical University, 1997.

Theoretical foundations and numerical algorithms for computer modeling of slime circulation and accumulation in circular water of coal preparation plant have been developed. This numerical approach facilitates assessment of actual and designed system of the water clarification. The results of the investigation increased efficiency of the mineral processing plant due to optimization its topology. Results of the thesis have been published in 26 scientific papers.

Key words:

coal preparation plant, slime circulation system, design optimisation, slime accumulation, computer model.

