

На правах рукописи

Ватлина Анна Михайловна



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМПЛЕКСА
ПОЛУЧЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ ИЗ
ТЕКУЩИХ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ**

Специальность 05.05.06 - Горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург - 2022

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Иванов Сергей Леонидович

Официальные оппоненты:

Шишлянников Дмитрий Игоревич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Горная электромеханика», доцент;

Хайрутдинов Марат Минизяетович

кандидат технических наук, Инженерное бюро ARUMtech GmbH, консультант.

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится 29 сентября 2022 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Закладка выработанного пространства при добыче полезных ископаемых позволяет повысить производительность, ликвидировать значительную часть хранящихся на земной поверхности твердых отходов, снизить влияние на окружающую среду. Применение гидрозакладки без предварительного обезвоживания закладочной гидросмеси является недостаточно эффективным, способствует излишнему обводнению подземных выработок, расслоению массива закладки. Обычно закладочные комплексы работают в непрерывном режиме приготовления смесей, в состав которых входят склады, регуляторы подачи воды, бункеры, дозаторы, мельницы, насосные агрегаты, трубопроводы, что является трудоемким и энергозатратным. Снизить энергоемкость процессов подготовки закладочных смесей возможно использованием текущих хвостов обогащения горно-обогатительных комбинатов. Однако концентрация твердого вещества в этих потоках колеблется в широких пределах, изменяя реологические свойства перекачиваемой смеси, что требует регулирования скорости вращения ротора насосного агрегата для сохранения перекачиваемого объема твердого и, как следствие, сопровождается изменением коэффициента полезного действия насосного агрегата в пределах, превышающих допустимые 5 % от максимального. При этом управление электродвигателем насосного агрегата путем изменения скорости его вращения не всегда является достаточным как по критериям технологического режима, так и с учетом требований к допустимому диапазону частоты вращения. Разрешить сложившуюся ситуацию возможно последовательным регулированием скорости вращения вала электродвигателя и корректировкой твердого вещества в пульпе, детерминировано добавляемого из комплекса сгущения, функционирующего параллельно грунтовому насосу с питанием от того же потока текущих хвостов обогащения.

Применяемые на практике способы регулирования режимов работы грунтовых насосов гидравлического транспорта хвостов обогащения направлены на обеспечение заданного расхода, но без учета концентрации массы твердой фазы в перекачиваемом объеме гидросмеси и требуют учета эффективности работы насоса в системе гидротранспорта с учетом изменения твердой фазы и развиваемого напора.

Необходимость решения вышеуказанных задач предопределяет актуальность диссертационной работы

Степень разработанности темы исследования.

Вопросы, связанные с гидравлическим транспортом гидросмесей, рассмотрены в трудах Вяткина А.П., Покровской В.Н., Смолдырева А.Е., Трайниса В.В., Анушенкова А.Н., Силина Н.А., Кравченко В.П., Леоновой Л.Б., Реппа К.Ю., Александрова В.И. и др. Ими проведены исследования по изучению характеристик гидросмесей хвостов обогащения, режимов работы и способов регулирования насосного оборудования, влиянию параметров гидросмеси на процесс транспортирования в системе закладочных комплексов горных предприятий. Однако остался недостаточно изучен вопрос обоснованного выбора параметров и режимов работы насосного оборудования в системе комплекса закладочных смесей при изменяющемся в широком диапазоне содержания твердого в пульпе текущих хвостов обогащения, применения комбинированного регулирования насосного оборудования при обеспечении его заданной производительности в системе комплекса, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.05.06 - Горные машины: п. 3 «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов».

Цель работы - выявление закономерностей формирования потока закладочной смеси из текущих хвостов обогащения при функционировании центробежного насосом для научно обоснованного технического решения управления насоса закладочного комплекса, имеющее существенное значение для развития горной отрасли страны.

Идея исследования.

Комбинация процессов регулирования концентрации твердого в закладочной смеси и функционирования центробежного насосного агрегата при сохранении в заданных пределах производительности последнего с одновременным удержанием коэффициента полезного действия в наперед заданных пределах.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести анализ и обобщение теоретических и экспериментальных материалов по теме диссертационной работы гидротранспортных систем и способов регулирования грунтовых насосов при перекачке гидросмесей различных концентраций.

2. Провести теоретические исследования насосного оборудования комплексов получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения систем гидротранспорта.

3. Предложить алгоритм регулирования насосного оборудования, используемого в составе закладочного комплекса.

4. Провести экспериментальные исследования по выявлению зависимости влияния концентрации твердого вещества в составе гидросмеси на режим работы насосного оборудования системы гидротранспорта.

5. Дать рекомендации по осуществлению комбинированного регулирования насосного агрегата закладочного комплекса получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения.

Научная новизна исследования:

1. Предложен алгоритм регулирования скорости ротора насосного агрегата комплекса получения закладочных смесей, обеспечивающего поддержание КПД насоса максимальным, реализацией последовательного детерминированного регулирования скорости вращения вала насоса с учетом плотности и вязкости перекачиваемой смеси и соответствующим изменением количества твердого в текущих хвостах обогащения введением в стущаемую пульпу последнего на входе в насосный агрегат.

2. Разработана имитационная модель регулируемого насоса с фиксацией мгновенной мощности, напора пульпы, а также модель внешних сопротивлений, имитирующих напорный трубопровод при изменениях плотности и вязкости пульпы.

Теоретическая и практическая значимости работы:

1. Обоснована возможность повышения эффективности работы насосного оборудования и поддержания максимального КПД с отклонением хода рабочей точки в диапазоне 5-10 %.

2. Разработана система регулирования грунтового насоса комплекса получения закладочных смесей. Проведены экспериментальные исследования, отражающие зависимость напора насоса от концентрации.

3. Предложены научно обоснованные технические решения, позволяющие повысить эффективность работы грунтового насоса при эксплуатации в системах гидротранспорта для перекачки гидросмесей.

4. Результаты исследований использованы в разработке системы управления электродвигателя насосного агрегата в АО ВО «Электроаппарат», г. Санкт-Петербург.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач используется комплексный подход, включающий научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, обработку и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в

области горных машин по определению основных параметров гидро-транспорта и КПД насоса в лабораторных и промышленных условиях, обработку результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный алгоритм регулирования скорости ротора насосного агрегата комплекса получения закладочных смесей позволяет поддерживать КПД насоса максимальным, тем самым снижая потребление энергии при транспортировке гидросмеси закладки при детерминированном увеличении концентрации твердой фазы из комплекса сгущения, функционирующего параллельно грунтовому насосу перекачки текущих хвостов обогащения при недостатке в потоке твердого и соответствующее поступление воды при избытке твердой фазы в текущих хвостах обогащения.

2. Система управления насосным агрегатом с центробежным насосом, перекачивающим текущие хвосты обогащения с переменной плотностью и вязкостью в качестве закладочной смеси, позволяет с достаточной точностью посредством корректирующего воздействия на электродвигатель насосного агрегата обеспечить работу агрегата с минимальными непроизводительными затратами энергии, используя данные о вязкости пульпы и содержания в ней твердого.

Степень достоверности результатов работы

Достоверность результатов работы подтверждается корректностью постановки цели и задач исследований; представительным объемом достоверной статистической информации; теория построена на известных, проверяемых фактах и хорошо согласуется с данными производственных наблюдений; экспериментальные исследования процесса регулирования режима работы насоса проводились с помощью имитационного моделирования и на специально собранной насосной установке, оснащенной аттестованными и поверенными приборами.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались на заседаниях кафедры машиностроения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», представлялись и получили положительную оценку на конференциях и семинарах. Основные положения и результаты работы сообщались, обсуждались и получили одобрение и положительную оценку на всероссийских и международных конференциях, в которых соискательница принимала участие: конференция ЕЕСЕ 2019 (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); международный семинар «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электро-механики IPDME» (г. Санкт-Петербург; 2020, 2021 гг.).

Личный вклад автора заключается во включенном участии на всех этапах процесса, непосредственном участии в получении исходных данных и научных экспериментах, личном участии в апробации результатов исследования, разработке экспериментальных установок и имитационных моделей, выполненных лично автором, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Публикации результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 7 печатных, в том числе в 5 работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и 2-х приложений. Диссертация изложена на 104 страницах машинописного текста, в том числе содержит 43 рисунка, 4 таблицы. Список цитируемой литературы включает в себя 107 источников.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность преподавателям кафедры машиностроения Горного университета, научному руководителю д.т.н., профессору Иванову С.Л., декану механико-машиностроительного факультета д.т.н., профессору Максарову В.В., к.т.н., доценту энергетического факультета Коржеву А.А., главному конструктору АО ВО «Электроаппарат» Карпову А.Л., ведущему инженеру-конструктору АО ВО «Электроаппарат» Наумкину В.А.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, цель, идея, задачи и научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, соответствие паспорту специальности, научные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, личный вклад, данные о публикациях автора.

В первой главе выполнена проработка степени изученности темы исследования. Проведен обзор горных машин, комплексов и оборудования закладочных комплексов.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе показано, что выбор частотного регулирования с введением байпасных линий, одна из которых при необходимости добавляет воду, а другая - твердое вещество, является эффективным способом регулирования. Описаны алгоритм, используемые компоненты в

системе гидротранспорта. Уделено внимание вопросу надежности системы гидротранспорта.

В третьей главе проводились экспериментальные исследования и имитационное моделирование системы, позволившие выявить закономерности изменения скорости вращения ротора от концентрации твердой фазы.

В четвертой главе разработано предложение по использованию в системе гидротранспорта закладочных смесей комбинированного способа регулирования, включающего частотный привод и две байпасные линии (по воде и твердому веществу соответственно).

Разработаны алгоритм и схема, позволяющие улучшить режим эксплуатации насосного агрегата и системы закладочного комплекса в целом.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1 Разработанный алгоритм регулирования скорости ротора насосного агрегата комплекса получения закладочных смесей позволяет поддерживать КПД насоса максимальным, тем самым снижая потребление энергии при транспортировке гидросмеси закладки при детерминированном увеличении концентрации твердой фазы из комплекса сгущения, функционирующего параллельно грунтовому насосу перекачки текущих хвостов обогащения при недостатке в потоке твердого и соответствующее поступление воды при избытке твердой фазы в текущих хвостах обогащения.

Закладочные комплексы делят на гидравлические, пневматические и твердеющей закладки. В закладочный комплекс входят дробильно-сортировочные установки, аккумулирующие бункеры, выпускные дозирующие устройства, система водоснабжения, смесительные устройства для приготовления закладочной гидросмеси, транспортные нисходящие и горизонтальные трубопроводы, устройства для обезвоживания закладочного материала и управления отработанной водой, система автоматического и дистанционного управления.

При значениях объемной концентрации и плотности смеси не превышающих 30 % снижаются технико-экономическая эффективность систем гидравлического транспорта.

Для транспортирования гидросмесей применяют центробежные насосы как наиболее удовлетворяющие агрегаты.

В связи с разными условиями технологических процессов, определяют состав твердых частиц по крупности, содержанию их в гидросмеси и другие характеристики, влияющие на эффективность комплекса получения закладочных смесей.

Важной характеристикой гидросмеси является концентрация твердой фазы в жидкости. Концентрация гидросмеси - степень насыщенности занимаемого гидросмесью объема твердым веществом.

Центробежный насос в системах гидротранспорта пульпы работает с переменными расходом и напором. Основной причиной неустойчивого режима работы насоса является нестабильность входных значений параметров пульпы, в основном содержания твердого материала в объеме перекачиваемой гидросмеси. Изменение содержания твердой фазы приводит к изменению плотности смеси и всех гидромеханических характеристик насоса при работе его на сеть.

Действующие и проектируемые системы гидротранспорта хвостов обогащения минерального сырья к закладочному комплексу рассчитываются по номинальным параметрам, таким как, средний гранулометрический состав твердой фазы, концентрация твердого вещества в объеме пульпы, расход гидросмеси. Однако практика показывает, что эти характеристики изменяются во времени по целому ряду технологических причин: изменение состава исходной руды из-за сегрегации в дробильно-измельчительном переделе, изменение выхода продукта при работе мельниц из-за износа шаров или стержней, колебание состава на выходе из гидроциклонов, колебания состава песков и пенных продуктов при флотации из-за изменяющегося состава реагентов, человеческий фактор, и др. В итоге поступает пульпа со значительными отклонениями параметров от номинальных или расчетных.

Система гидротранспорта работает эффективно, если рабочая точка отклоняется на 5-10 % от номинала.

Выбор частотного регулирования с введением байпасных линий, одна из которых при необходимости добавляет воду, а другая - твердое вещество, является эффективным способом регулирования. Данная система позволяет последовательно регулировать скорость вращения вала электродвигателя и корректировать твердое в пульпе из комплекса сгущения функционирующего параллельно грунтовому насосу с питанием от того же потока текущих хвостов обогащения.

Формула для получения гидродинамической характеристики центробежного насоса может быть аппроксимирована полиномом второго или третьего порядка.

Формула для напора насоса имеет вид (1)

$$H_n = H_{n0} - r_{n1}Q - r_{n2}Q^2, \quad (1)$$

где H_{n0} - статический напор насоса (напор холостого хода), м;
 r_{n1} , r_{n2} - коэффициенты, учитывающие потери напора в насосе.

Для определения коэффициентов уравнения (1) была написана программа на языке Scilab.

Данная программа позволяет получить искусственные характеристики насоса при различных значениях скорости вращения в диапазоне 10-100 % от номинальной. Расчет ведется на основании известных законов подобия. В качестве примера насоса для расчета был принят ГрАТ-225/67/3/2,2. Модель насоса, собранная в программе Scilab, представлена на рисунке 1.

Выражая из (1) напор насоса с учетом уравнений получим (2-5) (величины со штрихом соответствуют искусственной характеристике, а без штриха - естественной)

$$H'_n = H'_{n0} - r'_{n1}Q - r'_{n2}Q^2, \quad (2)$$

$$H'_{n0} = \frac{H_{n0}}{n_n^2} n^2, \quad (3)$$

$$r'_{n1} = \frac{r_{n1}}{n_n} n, \quad (4)$$

$$r'_{n2} = r_{n2}, \quad (5)$$

где n - номинальная частота вращения.

Уравнениям (2)-(5) соответствует следующая имитационная модель в XcosScilab.

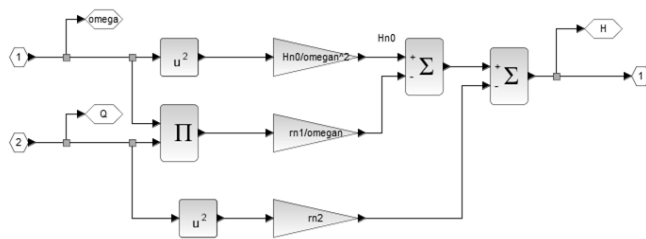


Рисунок 1 - Модель насоса, собранная в программе Scilab для напора

Для моделирования процессов в трубопроводе (рисунок 2) при изменении гидравлического сопротивления нагрузки была создана модель, включающая в себя программу инициализации Scilab и модель в Xcos.

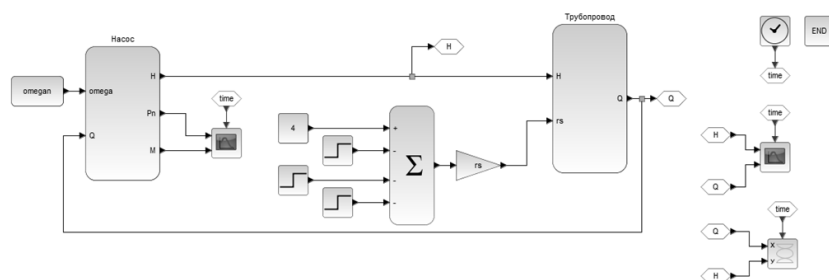


Рисунок 2 - Моделирование процессов, происходящих в трубопроводе при переменной нагрузке

В системах гидротранспорта, применяемых в горной промышленности, наблюдаются частые отказы технологического оборудования.

Ответственное положение гидротранспортных систем в технологическом процессе переработки полезного ископаемого (отказ системы гидротранспорта часто приводит к остановке всего технологического цикла) вынуждает использовать разнообразные методы, повышающие надежность работы гидротранспортных систем и насосных установок. Не рассматривая методы, применяемые конструкторами при проектировании оборудования гидротранспорта, рассмотрим только способы, широко используемые при эксплуатации горно-обогатительного оборудования, в частности - метод резервирования.

При разработке рабочих режимов работы систем гидротранспорта применяется общее резервирование или раздельное. Как известно из теории надежности второй способ резервирования обеспечивает более высокую надежность всей системы или установки при условии, что переключающие элементы обеспечивают высокий уровень надежности.

Резервирование позволяет создать из малонадежных элементов высоконадежную систему, однако вероятность безотказности работы будет всегда меньше единицы. В связи с этим возникает задача определения показателей надежности резервируемой гидротранспортной системы.

Предположим, что система состоит из n_1 рабочих элементов (насосов, трубопроводов, запорной арматуры и т.д.) и n_2 резервных элементов: $N = n_1 + n_2$. Предполагается, что каждый отказавший элемент практически сразу же после отказа обнаруживается и заменяется резервным из имеющихся n_2 резервных. Отказ системы произойдет тогда, когда число исправных элементов станет меньше n_1 , т.е. откажет n_{2+1} элемент. При отказе одна из имеющихся m ремонтных бригад приступает к ремонту отказавшего оборудования. Если отказано более m элементов, то возник-

нет очередь на ожидание ремонта. Будем считать, что все ремонтные бригады одинаковы, стабильны по составу и обеспечивают восстановление со средним временем восстановления T_B . Многочисленные наблюдения показывают, что время восстановления имеет обычно логарифмически-нормальное распределение. Но при условии, что среднее время восстановления значительно меньше средней наработки на отказ, можно считать, что время восстановления имеет экспоненциальное распределение. Элементы гидротранспортной системы конструктивно сложны и состоят из значительного числа деталей. Это дает основание считать, что интенсивность отказов постоянна во времени и равна $\lambda = 1/T_{cp}$ при установлении режима работы.

Обозначим через H_i состояние системы с i отказавшими элементами. Тогда граф переходов системы из одного состояния в другое (состояние H_{n2+l} - отражающее) будет иметь вид (6):

$$H_0 \xrightleftharpoons[\mu]{n_1\lambda} H_1 \xrightleftharpoons[2\mu]{n_1\lambda} H_2 \xrightleftharpoons[m\mu]{n_1\lambda} H_{n_2} \xrightleftharpoons[m\mu]{n_1\lambda} H_{n_2+1}, \quad (6)$$

где μ - интенсивность восстановления.

Если принять, что состояние H_{n2+l} - поглощающее, то фрагмент графа, включающий состояние H_{n2+l} и H_{n2+l} будет иметь вид (7):

$$H_0 \xrightleftharpoons[\mu]{n_1\lambda} H_1 \xrightleftharpoons[2\mu]{n_1\lambda} H_2 \xrightleftharpoons[m\mu]{n_1\lambda} H_{n_2} \xrightleftharpoons[m\mu]{n_1\lambda} H_{n_2+1} \xrightleftharpoons[m\mu]{2\lambda} H_{N-1} \xrightarrow{\lambda} H_N. \quad (7)$$

Остальные части графа не будут отличаться от состояния (6).

Для графа переходов (6) можно написать систему линейных дифференциальных уравнений (8):

$$\begin{cases} \dot{P}_0(t) = n_1\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ \dot{P}_1(t) = n_1\lambda P_0(t) - (n_1\lambda + \mu)P_1(t) + 2\mu P_2(t), \\ \dot{P}_2(t) = n_1\lambda P_0(t) - (n_1\lambda + 2\mu)P_2(t) + 3\mu P_3(t), \\ \dots, \\ \dot{P}_{n_2}(t) = n_1\lambda P_{n_2-1}(t) - (n_1\lambda + m\mu)P_{n_2}(t) + m\mu P_{n_2+1}(t), \\ \dot{P}_{n_2+1}(t) = n_1\lambda P_{n_2}(t) - m\mu P_{n_2+1}(t). \end{cases} \quad (8)$$

Если состояние H_{n2+l} - поглощающее, то система дифференциальных уравнений будет отличаться от предыдущей только двумя последними уравнениями, которые имеют вид (9):

$$\begin{cases} \dot{P}_{n_2}(t) = n_2\lambda P_{n_2-1}(t) - (n_1\lambda + m\mu)P_{n_2}(t), \\ \dot{P}_{n_2+1}(t) = n_1\lambda P_{n_2}(t). \end{cases} \quad (9)$$

Если используется система уравнений для случая, когда состояние H_{n_2+1} - отражающее, то в результате решения получатся вероятности $P_i(t)$ пребывания системы в некотором состоянии H_i , а сумма вероятностей состояний $H_0, H_1, \dots, H_{n_2}$ есть вероятность безотказной работы системы.

При использовании системы, когда состояние H_{n_2+1} - поглощающее, сумма указанных вероятностей есть коэффициент готовности системы.

Начальные условия для системы дифференциальных уравнений при $t = 0$ есть вероятности нахождения гидротранспортной установки в каждом из состояний. Естественно, что сумма этих вероятностей равна 1. Если установка начинает работать полностью исправной, т.е. началу работы соответствует состояние H_0 , то $P_0 = 1; P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{n_2+1} = 0$.

Из свойства линейных дифференциальных уравнений следует, что при $t \rightarrow \infty$ все вероятности P_i стремятся к некоторым установившимся значениям и, следовательно, при достаточно большом времени t производные $P_i'(t) \rightarrow 0$ и система дифференциальных уравнений превращается в алгебраическую систему (10). При состоянии H_{n_2+1} - отражающем

$$\begin{cases} n_1 \lambda P_0 = \mu P_1, \\ (n_1 \lambda + \mu) P_1 = n_1 \lambda P_0 + 2 \mu P_2, \\ (n_1 \lambda + 2 \mu) P_2 = n_1 \lambda P_1 + 3 \mu P_3, \\ \dots, \\ (n_1 \lambda + m \mu) P_{n_2} = n_1 \lambda P_{n_2-1} + m \mu P_{n_2+1}, \\ m \mu P_{n_2+1} = n_1 \lambda P_{n_2}. \end{cases} \quad (10)$$

При состоянии H_{n_2+1} - поглощающем изменения коснутся только двух последних уравнений, которые будут иметь вид (11):

$$\begin{cases} (n_1 \lambda + m \mu) P_{n_2} = n_1 \lambda P_{n_2-1}, \\ \sum_{i=0}^{n_2+1} P_i = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Решение приведенных уравнений (система алгебраических уравнений) будет следующим (12):

$$P_i = \frac{\theta_i}{\sum_{k=0}^N \theta_k}, \quad (12)$$

где

$$\theta_i = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_i}.$$

Индексы при λ и μ соответствуют индексу состояния, от которого направлены соответствующие переходы из одного состояния в другое.

Решением обеспечения максимального КПД является использование комбинированного способа регулирования. В систему закладочного комплекса включены частотный привод, байпасная линия подачи воды и байпасная линия подачи концентрированной твердой смеси. В применяемых системах используют либо отдельно частотный привод, либо байпасную линию, которая отводит избыточный объем перекачиваемой смеси, тем самым регулируя перекачиваемый объем без учета состава смеси. Это может быть, как и слишком жидкая пульпа, так и слишком густая. В первом случае насос работает недогруженным, а во втором - перегруженным, не соблюдая номинальный режим работы.

На рисунке 3 представлен алгоритм управления грунтовым насосом в системе закладочного комплекса. Уделено внимание вопросу надежности системы гидротранспорта.

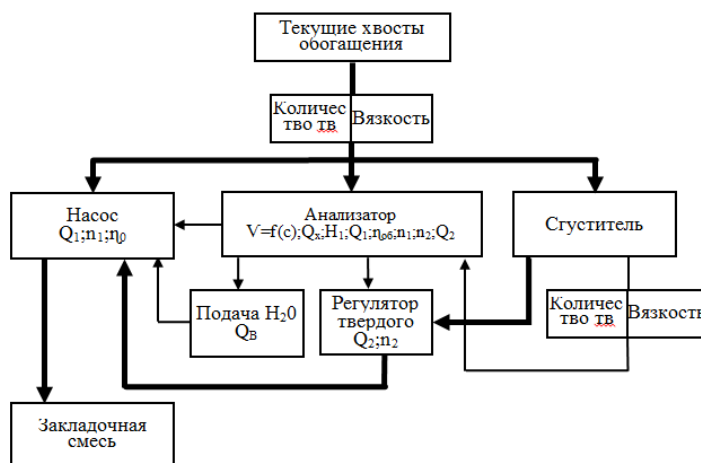


Рисунок 3 - Алгоритм управления грунтовым насосом в системе закладочного комплекса

2 Система управления насосным агрегатом с центробежным насосом, перекачивающим текущие хвосты обогащения с переменной плотностью и вязкостью в качестве закладочной смеси, позволяет с достаточной точностью посредством корректирующего воздействия на электродвигатель насосного агрегата обеспечить работу агрегата с минимальными непроизводительными затратами энергии, используя данные о вязкости пульпы и содержания в ней твердого.

Экспериментальные исследования, имитационное моделирование системы позволили выявить закономерности изменения скорости вращения ротора от концентрации твердой фазы.

Получены зависимости градиента скорости от концентрации, вязкости от концентрации, потери при транспортировке от скорости с учетом концентрации перекачиваемой смеси по количеству твердого вещества.

Реологические свойства гидросмесей хвостов обогащения начинают проявляться при определенных критических значениях концентрации твердой фазы, величины которых были установлены экспериментально на ротационном вискозиметре. Это определяется зависимостью напряжения сдвига от градиента скорости, функция имеет вид (13)

$$\tau = f(\gamma), \quad (13)$$

где τ - напряжение сдвига, Н/м²;

γ - градиент скорости, с⁻¹.

Опытные и расчетные данные по результатам экспериментов показаны на рисунках 4 и 5.

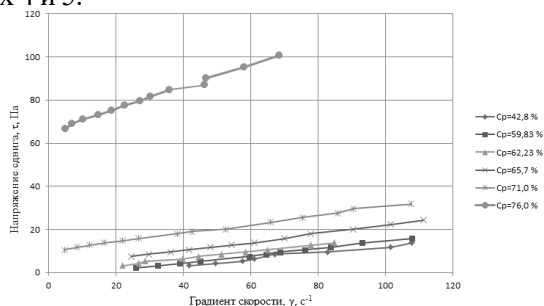


Рисунок 4 - Изменение функции градиента скорости при различных концентрациях хвостов обогащения медной руды

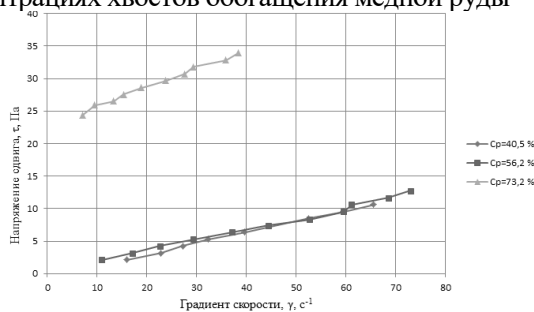


Рисунок 5 - Изменение функции градиента скорости при различных концентрациях хвостов обогащения медно-свинцовой руды

Анализ данных показал, что гидросмеси с концентрациями в диапазоне значений от 42,70 % до 62,23 % проявляют свойства ньютоновских жидкостей. С критических значений концентраций в диапазоне значений от 52,9 % (медно-свинцовая руда) до 63,0 % (медная руда) течение наступает после приложения значительной нагрузки, соответствующей начальному напряжению сдвига, что указывает на свойства неньютоновской жидкости. Структурная вязкость неньютоновского режима течения - тангенс угла наклона зависимости $\tau = f(\dot{\gamma})$ к оси абсцисс. Зависимость коэффициента вязкости от концентрации твердой фазы в объеме гидросмеси хвостов обогащения медной и медно-свинцовой руды представлена на рисунке 4. Критическое значение концентраций приходится на 73,5 % для медно-свинцовой руды и 74 % для медной руды. На основании полученных зависимостей и обработки данных, была получена формула для определения динамического коэффициента вязкости.

Разработано предложение по использованию в системе гидротранспорта закладочных смесей комбинированного способа регулирования, включающим частотный привод, и две байпасные линии (по воде и твердому соответственно) рисунок 6. Данная система, позволяет снижать экс-

плуатационные затраты, меньшей замены уже используемого оборудования и экономии энергии.

Схема комплекса закладочных смесей включает в себя зумпф исходной гидросмеси с импеллером 1, через который гидросмесь попадает в уравнительную емкость 2. Из уравнительной емкости 2 гидросмесь перемещается в сгуститель пластинчатого типа 4 и в сливной лоток 3, если имеется избыток. От сгустителя пластинчатого типа 4 гидросмесь проходит через радиоизотопный расходомер 5, регулируется задвижкой 6, попадая в зумпф сгущенной гидросмеси с импеллером 8.

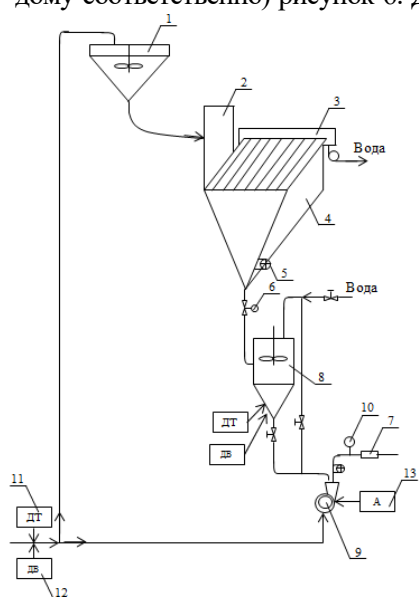


Рисунок 6 - Схема комплекса закладочных смесей из текущих хвостов обогащения

Оценку гидросмеси по содержанию твердого вещества и воды дают датчик расхода твердого вещества *11* и датчик расхода воды *12*. При установлении удовлетворительного качества гидросмеси ее направляют через грунтовый насос *9*. Если в гидросмеси недостаточное количество твердого вещества или жидкости, то недостающее направляют по байпасным линиями. Количество перекачиваемой смеси через грунтовый насос *9* контролируется расходомером *7*, манометром *10* и анализатором *13*.

Предложение по регулированию насосного агрегата нужно проверить в реальных условиях эксплуатации, так как экспериментальные исследования на лабораторной установке и имитационные модели показали целесообразность использования данного способа регулирования, рисунок 7.

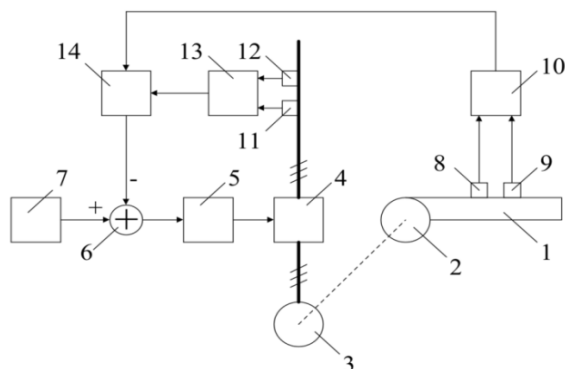


Рисунок 7 - Система управления насосом при транспортировке закладочной смеси к закладочному комплексу

Система управления центробежным насосом содержит нагнетательный трубопровод *1*, который через патрубок закреплен с насосным агрегатом *2*. Насосный агрегат *2* соединен муфтой с валом электродвигателя *3*. На нагнетательном трубопроводе *1* установлены с возможностью съема датчик давления *8* и датчик расхода *9*, информационные выходы которых соединены с измерительными входами вычислителя гидравлической мощности *10*. Электродвигатель *3* питающим кабелем соединен с преобразователем частоты *4*. Выход устройства регулирования скорости *5* сигнальным кабелем соединен с управляющим входом преобразователя частоты *4*. Вход элемента сравнения *6* соединен с выходом устройства

задания скорости 7, а выход соединен с входом 5. На входе преобразователя частоты 4 установлены с возможностью съема датчик фазного тока 11 и датчик фазного напряжения 12, выходы соединены с измерительными входами вычислителя электрической мощности 13. Информационные выходы вычислителя гидравлической мощности 10 и вычислителя электрической мощности 13 соединены с информационным входом устройства вычисления потерь энергии 14, выход которого соединен с входом элемента сравнения 6.

Таким образом, используя комбинированную систему, предлагается усовершенствовать существующие системы транспортирования закладочных смесей для закладочных комплексов. Разработаны алгоритм и схема, позволяющие улучшить режим эксплуатации насосного агрегата и системы закладочного комплекса в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой представлено новое научно-обоснованное технико-технологическое решение повышения эффективности работы насосного оборудования комплекса закладочных смесей.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Проведен анализ и обобщение теоретических и экспериментальных материалов по теме диссертации гидротранспортных систем и способов регулирования грунтовых насосов при транспортировании гидросмесей различных концентраций.

2. Проведены теоретические исследования насосного оборудования комплекса получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения систем гидротранспорта.

3. Предложен алгоритм регулирования насосного оборудования, используемого в составе закладочного комплекса.

4. Проведены экспериментальные исследования по выявлению зависимости влияния концентрации твердого вещества в составе гидросмеси на режим работы насосного оборудования системы гидротранспорта.

5. Даны рекомендации по осуществлению комбинированного регулирования насосного агрегата закладочного комплекса получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения в соответствии с предложенным способом управления центробежным насосом, защищенным патентом № 2770528 Российской Федерации.

6. Результаты исследований использованы при разработке системы управления электродвигателя насосного агрегата в АО ВО «Электроаппарат», г. Санкт-Петербург.

Развитие идеи комбинации процессов регулирования концентрации твердого в закладочной смеси и функционирования центробежного насосного агрегата при сохранении в заданных пределах производительности последнего с одновременным удержанием коэффициента полезного действия в наперед заданных пределах является перспективным направлением в дальнейшем развитии функционирования насосного оборудования комплекса получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения, позволяя снизить затраты на функционирование закладочного комплекса.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

1. Bolshunova, O.M. Determination of multicomponent media permittivity by high-frequency method / O.M. Bolshunova, A.A. Korzhev, A.M. Vatlina, A.M. Kamyshyan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2018. - 194(6). - 062004.

2. Korzhev, A.A. Mathematical simulation of transient operation modes of an electric drive of a centrifugal pump for a slurry pipeline/ A.A. Korzhev, O.M. Bolshunova, I.N. Voytyuk, A.M. Vatlina // E3S Web of Conferences. - 2019. - 140. - 04012.

3. Aleksandrov, V.I. Analysis of actual head losses in hydraulic transportation of WMS tailings along steel and polyurethane-lined slurry pipelines at Kachkanarsky GOK / V.I. Aleksandrov, V.A. Atroshchenko, A.M. Vatlina // Obogashchenie Rud. - 2021. - Vol.6. - pp. 53-58.

4. Kuskildin, R.B. Method of accelerated industrial testing of hydroabrasive wear of polymer coatings of steel pipes / R.B. Kuskildin, A.M. Vatlina // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - 1728(1). - 012029.

5. Bolshunova, O.M. Power stabilization system for the regulated electric drive of transport vehicles / O.M. Bolshunova, A.A. Korzhev, A.M. Vatlina // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - 1753(1). - 012014.

Публикации в прочих изданиях:

6. Большунова, О.М. Влияние концентрации гидросмеси на энергоэффективность работы системы насос-пульпопровод /

О.М. Большунова, А.М. Ватлина, А.А. Коржев // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. - 2021. - С. 147-149.

7 Большунова, О.М. Исследование приборов для контроля влажности при транспортировке жидких и сыпучих материалов / О.М. Большунова, А.А. Коржев, А.М. Ватлина // Инновации на транспорте и в машиностроении. сборник трудов IV международной научно-практической конференции. - 2016. - С. 18-21.

Патент:

8. Патент № 2770528 Российская Федерация, МПК F04D 15/00 (2006.01). Система управления центробежным насосом: № 2770528: заявл.08.12.2021, опубл. 18.04.2022 / Александров В.И., Коржев А.А., Ватлина А.М.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. Бюл. №11 - 6 с.: ил.