

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Иванов С.Л.

Санкт-Петербург - 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРОТРАНСПОРТА ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПУЛЬП К ЗАКЛАДОЧНОМУ КОМПЛЕКСУ	10
1.1 Закладочный комплекс и оборудование, входящее в него	10
1.2 Классификация насосов для перекачки жидкостей.....	22
1.3 Классификация гидросмесей	26
1.4 Гидротранспорт высококонцентрированных смесей.....	30
1.5 Влияние параметров гидросмеси на режим работы системы «насос- трубопровод»	31
1.6 Зависимость удельных потерь напора от концентрации твердой фазы и плотности гидросмеси	34
1.7 Виды регулирования грунтового насоса в системе гидротранспорта.....	36
1.8 Выводы по первой главе	39
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГРУНТОВЫХ НАСОСОВ ПРИ ГИДРОТРАНСПОРТЕ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ	42
2.1 Зависимость КПД насоса при изменяющейся концентрации	42
2.2 Модель насосного агрегата с регулированием по изменяющимся параметрам, имитирующим концентрацию и вязкость	45
2.3 Обоснование выбора частотного регулирования с введением байпасных линий в систему комплекса закладочных смесей из текущих хвостов обогащения	50
2.4 Оценка уровня надежности системы транспортирования гидросмеси	61
2.5 Выводы по второй главе.....	65
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ГИДРОСМЕСЕЙ С ПЕРЕМЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ К ЗАКЛАДОЧНОМУ	

КОМПЛЕКСУ	66
3.1 Влияние объёмной концентрации гидросмеси на работу системы насос-пульпопровод.....	66
3.2 Моделирование режимов работы установки транспортирования хвостов обогащения железной руды	70
3.3 Лабораторный стенд для исследований режимов работы грунтового насоса при разной концентрации	77
3.4 Выводы по третьей главе	83
ГЛАВА 4 СИСТЕМА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	84
4.1 Схема комплекса закладочных смесей их текущих хвостов обогащения	84
4.2 Оценка эффективности системы гидротранспорта закладочных смесей .	85
4.3 Выводы по четвертой главе	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	88
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	90
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов	104

ВВЕДЕНИЕ

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 учёта 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.

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.

Целью исследования является 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 заключается в 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.

Задачи исследования:

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:

- 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 сгущаемую пульпу последнего на входе в насосный агрегат.

- 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:

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

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

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

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 гидротранспорта и КПД насоса в лабораторных и промышленных условиях, обработку результатов.

Соответствие паспорту специальности

Тема исследования соответствует следующей области исследования паспорта научной специальности 05.05.06 - Горные машины: п. 3 «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов».

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 и апробация 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 диссертационной работы проводилась на заседаниях кафедры машиностроения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», докладывалась и получила 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 электромеханики IPDME» (г. Санкт-Петербург; 2020, 2021 гг.).

Личный вклад автора

Включенное участие на всех этапах процесса, непосредственное участие в получении исходных данных и научных экспериментах, личное участие в апробации результатов исследования, разработка экспериментальных установок и имитационных моделей, выполненных лично автором, подготовка 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.

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРОТРАНСПОРТА ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПУЛЬП К ЗАКЛАДОЧНОМУ КОМПЛЕКСУ

1.1 Закладочный комплекс и оборудование, входящее в него

Работа систем гидравлического транспорта, входящих в комплекс получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения и включающих в себя насосное оборудование на горно-обогатительных комбинатах и обогатительных фабриках, характеризуется определенным режимом работы, учитывающим такие технологические параметры гидротранспортной системы как производительность (расход), давление, развиваемое грунтовым центробежным насосом.

Производительность гидротранспортной системы меняется во времени в зависимости от режима работы трубопровода и насосного агрегата. Центробежный насос в системах гидротранспорта пульп работает в условиях переменного расхода и напора. Неустойчивый режим работы насоса обусловлен постоянной изменчивостью входных значений параметров пульпы. Важным фактором, влияющим на изменение, является содержание твердого материала и воды в объеме перекачиваемой неньютоновской жидкости. Количественное содержание твердого вещества влияет на изменение плотности смеси, соответственно, в зависимости от этого изменятся гидромеханические характеристики насоса при работе его на сеть, такие как мощность, КПД, напор, расход [24].

Действующие и проектируемые системы гидротранспорта рассчитываются по номинальным параметрам - средний гранулометрический состав твердой фазы, концентрация твердого в объеме пульпы, расход гидросмеси. Однако практика показывает, что эти характеристики изменяются во времени по целому ряду технологических причин: плановые остановки на ремонт и обслуживание, 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 пенного продуктов при флотации из-за изменяющегося состава реагентов, человеческий фактор и др. В связи с этим в завершении технологического процесса обогащения пульпа поступает со значительными отклонениями параметров от номинальных или расчетных.

Анализ причин отклонений режимов работы гидротранспортной системы показал, что помимо превышения или понижения допустимых значений давления, необходимо снижать энергетические и эксплуатационные затраты. В качестве примера можно указать работу А.Е. Смолдырева [86], в которой рассматривается влияние на изменения технических, технологических и случайных факторов на производительность гидротранспортного трубопровода.

Исследования включали эксперименты по определению параметров гидротранспорта хвостов обогащения, сгущенных до массовой доли твердого 30-70 %, с проведением лабораторных и опытно-промышленных испытаний. Их данные подтвердили технико-экономическую эффективность гидравлического транспорта хвостовых пульп с массовой долей твердого от 7 % до 53 %. Исследования проводились на площадке перекачивающей станции II пульпонасосной станции ЦХХ Качканарского ГОКа. По результатам опытно-промышленных испытаний была разработана методика и выполнен расчет удельных потерь напора при гидротранспорте, сгущенных до массовой концентрации 40 % хвостов [2].

Горнодобывающая отрасль производит ежегодно около 30 млрд. т твердых отходов. При этом в хвостовые отвалы после обогащения извлеченного сырья отправляется от 60 % до 95 % исходной массы. Как правило, шлам накапливается в отвалах и складах без дальнейшего извлечения оставшейся руды, из-за некупаемых затрат на данное мероприятие. Хвостохранилища располагаются на поверхности и не только

занимают полезную площадь, но и наносят вред экологии из-за постоянного переноса поверхностного слоя (пыль, песок) вокруг, тем самым загрязняя воздух и располагающиеся рядом водоемы. По данным общая площадь земель, занятых под склады твердых отходов в странах СНГ, сегодня превышает 1,5 млн. га. На Урале, занимаемая площадь под хвостохранилища, достигает более 504 га, и в ближайшем будущем будет только увеличиваться.

Применение комплексов получения закладочных смесей из хвостов обогащения решает проблему заполнения поверхности хвостами обогащения. Невостребованные продукты после переработки могут использоваться непосредственно около закладочного комплекса как основной компонент. Например, Учалинский горно-обогатительный комбинат производит щебень и дробленый песок для закладки выработанного пространства. Преимущество данного применения хвостов сокращает занимаемые площади, снижает нагрузку на транспортную и экономическую системы благодаря тому, что не транспортируется пустая порода к местам хранения шлама, а использует непосредственно на месте добычи в составе закладочной смеси.

В России в настоящее время используется ограниченная часть хвостов для закладки выработанного пространства горно-обогатительных предприятий.

Использование отработанных пустот позволяет сократить затраты на транспортирование шлама к хвостохранилищам, тем самым уменьшая использование полезной площади для размещения отходов. Это снизит необходимость строительства полигонов для отходов и освободит земли для сельского, лесного хозяйства и других сфер деятельности. Исследованиями в области разработки закладочных комплексов посвящены научные труды ученых: О.А. Байконурова, А.П. Вяткина, Л.А. Крупника, В.И. Хомякова, К.Ю. Реппа, Л.Б. Леоновой и многих других [8, 9, 14-18, 42, 44, 45, 60-62, 65, 71, 73-75, 94, 95].

Для рудных месторождений используют засыпку внутреннего пространства располагающихся вблизи отработанных карьеров [88] Такой способ, например, применен на участках Учалинского, Донского горно-обогатительных комбинатов, на карьерах объединений «Южуралникель», «Севбокситруда», комбината «Магнезит» и др.

Твердеющая закладка имеет такое преимущество, как получение прочного монолитного массива, соответственно, чаще применяется [22, 27, 28, 38, 49-51, 56, 58, 65, 75, 77-79, 81].

Приготовление закладочной смеси, как правило, происходит на поверхности в закладочных комплексах. Строительство закладочных комплексов сопровождается определенными финансовыми затратами, усложняет технологическую схему гидротранспортной системы. Тем не менее, получение закладочной смеси из отходов добычи с дальнейшим использованием их в выработанном пространстве позволяет горнодобывающему предприятию повысить экономическую эффективность и несколько снизить воздействия отходов на окружающую среду.

В связи с целесообразностью использования закладочных комплексов, необходимо применять оборудование, повышающее надежность системы, а в случае выхода из строя, позволяющего провести быстрый ремонт или замену [1] Важным и быстро выходящим из строя узлом гидротранспортной системы является насосный агрегат. Проанализировав теоретические и практические исследования, можно выявить факторы, влияющие на изменение нагрузки на рабочие колеса насоса, а соответственно, и причины выхода из строя. Причины, негативно воздействующие на агрегат следующие:

- повышение концентрации твердой фазы;
- уменьшение внутреннего диаметра трубопровода;
- снижение надежности оборудования.

В зависимости от этих факторов меняется режим течения гидросмеси по пульпроводу, что приводит к смещению рабочей точки системы «насос-

трубопровод» и к необходимости ее регулировки в целях поддержания рабочей точки номинального коэффициента полезного действия насосных агрегатов.

Закладочные комплексы разделяют на гидравлические, пневматические и твердеющей закладки. В состав гидравлических закладочных комплексов входят дробильно-сортировочные установки, аккумулирующие бункеры, выпускные дозирующие устройства, система водоснабжения, смесительные устройства для приготовления закладочной гидросмеси, транспортные трубопроводы наклонного и горизонтального вида, устройства для обезвоживания закладочного материала и управления отработанной водой, системы автоматического и дистанционного управления. Гидрозакладочные комплексы бывают с естественным напором, то есть без необходимости в насосном оборудовании (самотек) и с искусственным напором: с помощью перекачивающих устройств, где требуется работа насосов с загрузочными аппаратами, землесосов и подобного оснащения, располагающихся в начальной или конечной точках транспортирования; напорно-самотечными. Закладочный материал накапливается в бункерах поверхностного или заглубленного типа при участии смесительных устройств для приготовления закладочной гидросмеси. При поверхностном расположении бункера и смесительных устройств обеспечивается максимальный напор, радиус действия и производительность гидрозакладочного комплекса. При отсутствии возможности расположить оборудование на поверхности земли, например, если место нахождения имеет суровые северные условия, гидрозакладочный комплекс заглубляют. Обезвоживают закладочный материал (до 90-95 %) с помощью передвижных или полустационарных водоотделителей в основном центробежного типа (дуговые и конические сита, гидроциклоны), смонтированных на шахтных вагонетках.

Следующий вид комплексов - пневмозакладочные комплексы. Данные комплексы включают в себя дробильно-сортировочные установки с

аккумулирующими бункерами и выпускными дозирующими устройствами, средства промежуточного транспорта закладочного материала, пневмозакладочную машину - загрузочный аппарат, транспортирующий и распределительный трубопроводы, систему автоматического управления. Пневмозакладочные комплексы делят на комплексы с доставкой породы с поверхности, с полным и с частичным использованием породы. При подготовке закладочный материал подается пневматически или комбинированно в выработанное пространство. При пневматической подаче на поверхности располагаются дробильно-сортировочные установки, стационарная пневмозакладочная машина камерного типа. Спуск и доставка материала осуществляются без перегрузки пневмотранспортом по трубопроводу. При комбинированной подаче подготовленный на поверхностной дробильно-сортировочной установке материал спускается на закладочный горизонт по трубопроводам, далее транспортируется в вагонетках или конвейерами до участковых закладочных установок.

Третий тип комплексов представляет собой комплексы твердеющей закладки, используемые для непрерывного приготовления твердеющей смеси. Их располагают стационарно на поверхности вблизи закладочного ствола или скважины. Различают комплексы твердеющей закладки литой (наиболее распространены) и жесткой закладки. Комплексы литой закладки применяют при значительных расстояниях транспортирования (2500-3000 м) и наличии дешевых местных вяжущих компонентов, обеспечивают стабильность консистенции гидросмеси и равномерность её подачи, устойчивую работу транспортного трубопровода. Комплексы жесткой закладки применяют при средних значениях производительности и расстояний транспортирования (500-900 м) [41]. Транспортируются компоненты отдельно, и смешиваются непосредственно перед заполнением выработанного пространства.

Имеются различаются по способу приготовления и транспортирования закладочной смеси к месту укладки [19, 31, 43, 47, 64, 68, 82].

Для примера приведены схемы закладочных комплексов смесей, применяемых на обогатительных предприятиях.

На рисунке 1.1 показана технологическая схема участка Таштангольского закладочного комплекса [6, 7].

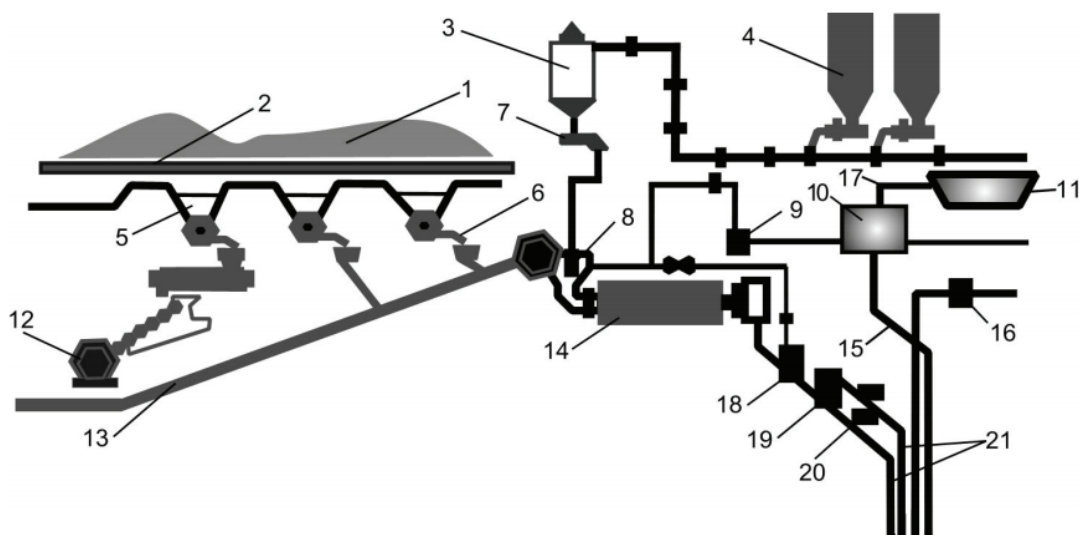


Рисунок 1.1 - Технологическая схема поверхностного участка закладочного комплекса

На рисунке 1.1, расположение закладочных трубопроводов 21 определяется местом расположения трубно-ходового гезенка. Связывает все объекты комплекса закладочной смеси из текущих хвостов обогащения трубопровод, расположенный на поверхности. Смесь проходит путь до трубно-ходового гезенка от шаровой мельницы 14 через расположенные под уклоном узлы: узел контроля качества 18, бак распределения смеси 19, обратный клапан продувки трубопровода 20. Со складов компонентов 1 и вяжущего вещества 4, водосборника 11 составные части смеси поступают в закладочный трубопровод через грохот 2, бункеры 3 и 5, дозаторы 6 и 7, репульпатор 8, регулятор подачи воды 9, расходный бак воды 10, дробилку 12, регулятор сжатого воздуха 16, насос 17 по ленточному конвейеру 13 и водопроводу 15. В данной схеме участка закладочного комплекса не предусмотрен грунтовый насос, регулирование осуществляется системой труб, которые подведены к выработанному пространству. Минус такой

системы в том, что нет возможности получать однородную закладочную смесь без избытка воды в случае недостаточного количества твердой фазы в пульпе.

Схема закладочного комплекса Малеевского рудника представлена на рисунке 1.2.

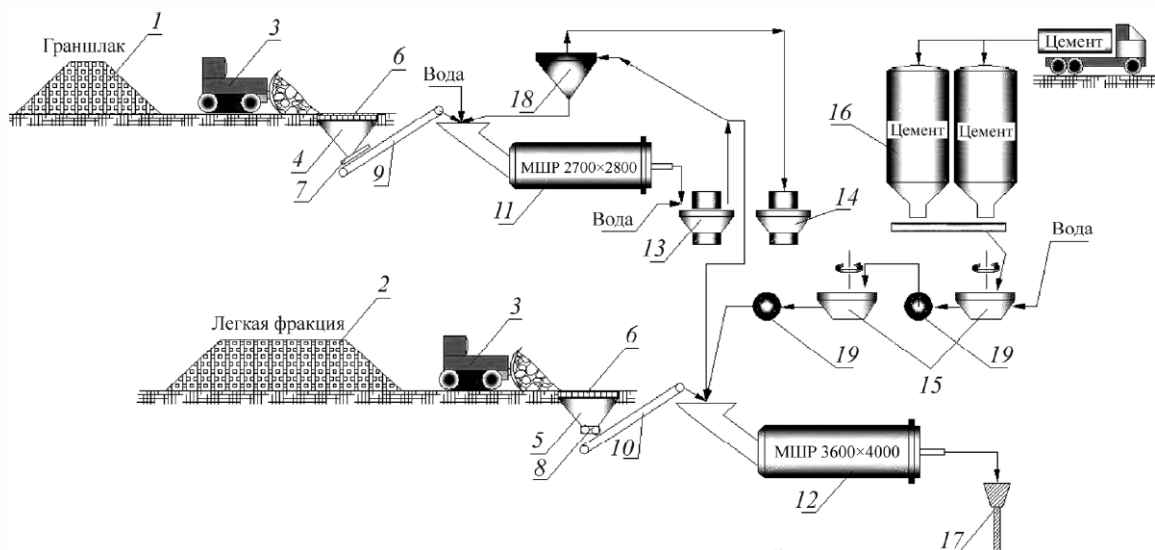


Рисунок 1.2 - Технологическая схема закладочного комплекса Малеевского рудника

Технология приготовления закладочной смеси включает следующие этапы: загружается граншлак из отвала 1 путем транспортирования бульдозером 3 в приемный бункер 4 с колосниковой решеткой 6 и шибером 7. Далее производится дозированная подача граншлака из бункера и транспортировка его по ленточному конвейеру 9 в мельницу 11. Помол граншлака в мельнице сопровождается подачей в нее дополнительной воды. Смесь с дополнительной водой перекачивается центробежным насосом 13 в мельницу 12. Также на мельницу 12 транспортируется бульдозером 3 легкая фракция из отвала 2 через бункер 5 с колосниковой решеткой 6 и питателем 8 по ленточному конвейеру 10. Кроме шлака и воды в закладочную смесь добавляется цемент в качестве связующей составляющей. Производится прием цемента, он направляется в расходные емкости 16 и далее в

устройство дозирования цементного молока 15. После смесь транспортируется перекачивающими насосами 19 в мельницу 12. Далее пульпа поступает через закладочную скважину 17 в выработанное пространство для закладки. Весь процесс приготовления смеси может осуществляться как в автоматическом, так и ручном режимах работы. На этапах приготовления закладочной смеси следят за ее движением и качеством. В этом участвуют гидроциклон 18 и насос 14.

На рисунке 1.3 изображена типовая схема приготовления двухкомпонентной закладочной смеси.

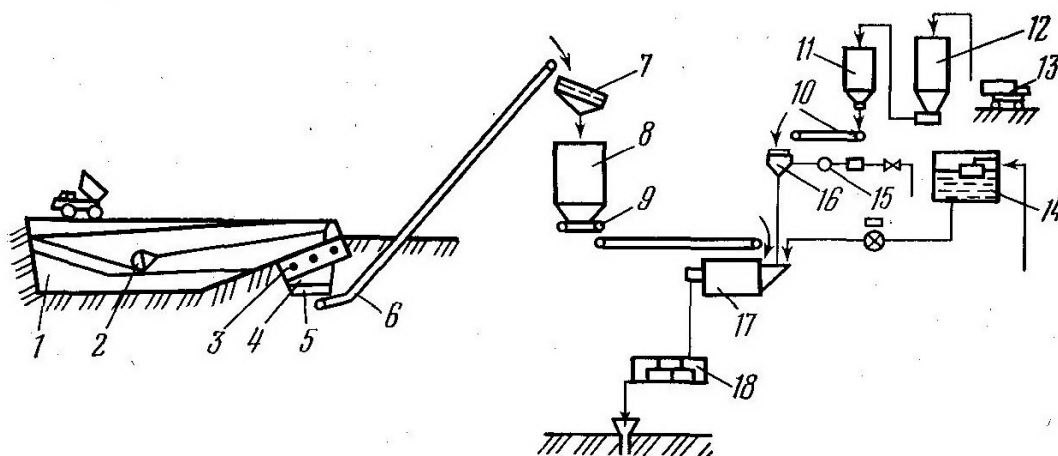


Рисунок 1.3 - Схема приготовления цементной закладочной смеси

Отходы обогащения проходят через склад заполнителя 1, скрепер 2, колосниковый грохот 3, бункер 4, питатель 5 до ленточного конвейера 6. Далее твердая фаза, проходя через виброгрохот 7 и питатель 9, смешивается с цементирующей составляющей, следующей через питатель цемента 10, приемную силоса цемента 12, затвор цемента 16, доставленную цементовозом 13. Также добавляется вода из бака, где поддерживается постоянный уровень воды 14. Расход составляющих закладочной смеси определяется расходным бункером заполнителя 8, расходным силосом цемента 11 и расходомером воды 15. Далее смесь поступает в барабанный смеситель 17 и уравнильный смеситель 18 к месту закладки.

На рисунке 1.4 изображена технологическая схема закладочного комплекса рудника «Комсомольский».

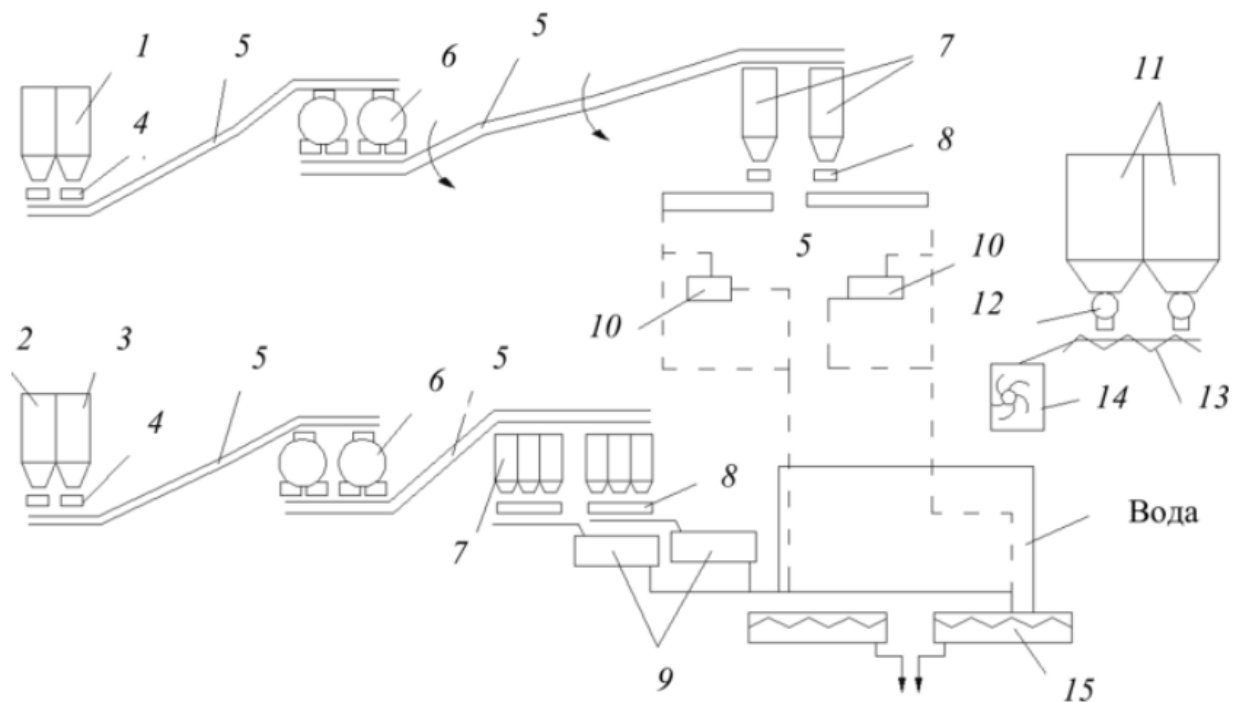


Рисунок 1.4 - Технологическая схема закладочного комплекса рудника
«Комсомольский»

Песок, ангидрит и шлак из бункера 1, 2 и 3, соответственно, добавляются в необходимых количествах питателями 4 в молотковую дробилку 6 по конвейерам 5. Затем перегружаются в бункер 7. Далее ангидрит и шлак через дозаторы 8 поступают в шаровые мельницы 9, песок поступает в сушильный барабан 10. Цемент из бункера 11 поступает в шнек 13 через дозатор 12. Шнеком 13 цемент загружается в репульпатор 14, перемещается в смеситель 15 и смешивается с просушенным песком, измельченным шлаком и ангидритом в шаровых мельницах. Количество воды, поступающей в смеситель, регулируется задвижкой.

Анализ приведенных схем приготовления закладочной смеси показывает, что при использовании в качестве заполнителя хвостов текущей переработки значительно упрощается весь технологический процесс. Отпадает необходимость в предварительном дроблении исходного материала, снижается энергоемкость процесса. Однако необходимо отметить, что такие схемы не нашли широкого применения в горной промышленности. Лишь на некоторых предприятиях применяются для закладки хвосты

текущей переработки. Это можно объяснить тем, что операции по дроблению полученного шлама для использования в качестве составляющей закладочной смеси и дальнейшее строительство для этих нужд комплексов, считают довольно затратным и ненужными, учитывая пространство вокруг, которое нежелательно, но возможно использовать под хвостохранилище. Тем не менее, данные мероприятия окупаемы, при этом снижается влияние на экологию, не попадает пыль и сами хвосты обогащения в окружающую среду.

Во всех системах транспортируемым продуктом являются концентрированные гидросмеси из измельченных частиц минерального сырья или измельченных твердых и волокнистых материалов (органических или неорганических), которые при увеличении концентрации обладают вязко-пластичными свойствами.

Способы приготовления гидросмеси для транспортирования делят на следующие группы:

- со сгущением смеси до концентраций, при заданном расчетном режиме;
- без сгущения смеси.

На режим работы пульпопроводов систем гидротранспорта влияют исходные данные по концентрации, реологические свойства, размеры частиц текущих хвостов, площадь поперечного сечения трубопровода, условия работы сети. На площадь поперечного сечения и скорость течения гидросмеси может повлиять степень заиливания, несоответствие диаметра трубопровода, например, при ошибочных расчетах, недостаток информации по параметрам потока смеси: средняя скорость течения, гидравлический уклон при критических и средних скоростях потока пульпы. Так же влияет покрытие эксплуатируемого пульпопровода. В работе [2] приведены результаты исследований, в которых отмечено, насколько эффективнее использовать полиуретановое покрытие внутренней поверхности стального трубопровода по сравнению с трубопроводом без покрытия. Исследования

включали определение в лабораторных условиях удельных потерь напора при гидротранспорте с массовой концентрацией 17 % и его песков с массовой концентрацией 60 %. В качестве экспериментальных пульповодов исследовались работающие пульповоды №202 - с внутренним полиуретановым покрытием и №203 - без покрытия Качканарского горно-обогатительного комбината.

В таблицах 1.1 и 1.2 показаны результаты исследований.

Таблица 1.1 – Средневзвешенные параметры гидротранспорта хвостовой пульпы в футерованном пульповоде № 202

Расход, м ³ /ч	Потери напора, м вод. ст./м	Плотность, кг/м ³	Скорость, м/с
14475	0,0241	1150	5,17
14379	0,0195	1066	5,13
14472	0,0257	1139	5,15
14525	0,0242	1148	5,19
14378	0,0238	1047	5,14

Таблица 1.2 – Средневзвешенные параметры гидротранспорта хвостовой пульпы в нефутерованном пульповоде № 203

Расход, м ³ /ч	Потери напора, м вод. ст./м	Плотность, кг/м ³	Скорость, м/с
12544	0,0141	1047	4,48
14903	0,0100	1134	5,32

По итогам измерений давления на опытных участках футерованного пульповода № 202 линейные удельные потери напора в нем составили 23,5 м вод. ст./м, средняя плотность хвостовой пульпы - 1110 кг/м³, средняя скорость потока пульпы - 5,16 м/с. Измерения давления на опытных участках нефутерованного пульповода № 203 линейных удельных потерь напора в нем составили 12 м вод. ст./м, средняя плотность хвостовой пульпы - 1090 кг/м³, средняя скорость потока пульпы - 4,9 м/с.

Сравнение значений удельных потерь напора в стальном футерованном и стальном нефутерованном пульповодах показывает, что в футерованном они в 1,2 раз меньше, чем в нефутерованном: $n = I_{ст} / I_{фут} = 0,0282 / 0,0235 = 1,2$. Снижение удельных потерь напора обусловлено меньшей шероховатостью внутренней поверхности пульповода, футерованного слоем полиуретана, что подтверждает результаты теоретических и лабораторных исследований. Снижение общего напора гидротранспортной системы при замене пульповодов без покрытия на пульповоды с полиуретановым покрытием в зимнее и летнее время составляет 20 %.

При значениях концентрации смеси, не превышающей 30 %, заметно снижение эффективности систем гидравлического транспорта. Низкая эффективность влияет на стоимость продукта и на потери энергии при транспортировке.

Важным агрегатом системы гидротранспорта является насос.

1.2 Классификация насосов для перекачки жидкостей

На рисунке 1.5 представлена схема видов насосов по принципу действия и конструкции [34, 35].

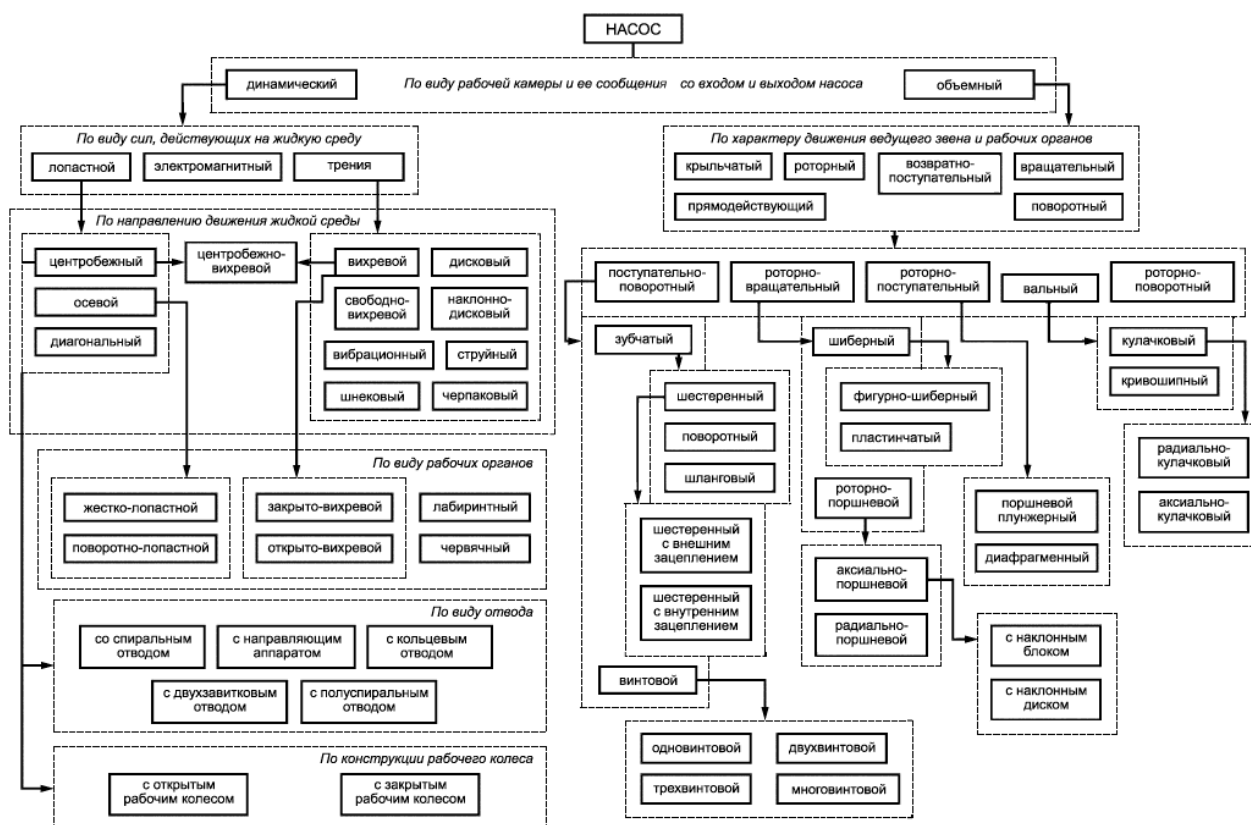


Рисунок 1.5 - Виды насосов по способу действия

Объемные насосы перемещают жидкость при периодическом изменении объема рабочей камеры, жидкость попеременно находится с входным и выходным патрубками.

Насосы данного вида имеют достаточно высокое значение коэффициента полезного действия, в зависимости от размера он варьируется от 80 % до 99 %. Применение такие насосы нашли в транспорте в качестве топливных насосов, нагнетательных, в машинах среднего и высокого давления.

Шестеренный насос конструктивно состоит из двух шестерен: ведущей и ведомой, находящихся в зацеплении и расположенных в едином корпусе с небольшими радиальными и торцевыми зазорами. Зубья шестерен находятся в непрерывном зацеплении, за счет их работы происходит движение жидкости.

Данные насосы применяют в смазочной системе двигателей внутреннего сгорания и гидросистемах тракторов и сельскохозяйственных

комбайнов. Максимальный коэффициент полезного действия достигается при перекачке вязкой жидкости без включения абразивных частиц.

Диафрагменный насос имеет особенности в виде гибкой мембраны из эластичного материала. Гибкая мембрана, жесткий диск и шток совершают возвратно-поступательное движение. Принцип действия аналогичен работе поршневого насоса.

Диафрагменные насосы применяют в системе топливоподачи карбюраторных двигателей, для водоотлива при производстве строительных работ - работ с сильно загрязненными жидкостями.

Пластинчатый насос состоит из цилиндра с прорезями (пазами), в которых размещены прямоугольные пластины-вытеснители, совершающие при вращении располагающегося внутри ротора возвратно-поступательное движение.

Воздействие на жидкость в пластинчатом насосе схоже с поршневым насосом, но движение - вращательное движение, а клапаны не требуются. Жидкости с включением абразивных не приветствуются, в связи с тем, что при трении пластины изнашиваются и существует вероятность заклинивания.

Пластинчатые насосы нашли применение в гидроприводах автопогрузчиков и гидравлических усилителях.

Объемные насосы являются самовсасывающими, то есть могут работать без предварительной заливки, перемещая вначале газы и пары, а затем уже жидкость.

Центробежный насос перемещает жидкость в рабочем колесе с криволинейными лопатками, большое значение имеют центробежные силы в преобразовании.

Осевой насос двигает жидкость при незначительном изменении от оси вращения рабочего колеса; широко используются как циркуляционные насосы теплоэлектростанций, в ирригационных системах и т.д.

В диагональных насосах перемещение жидкости в радиальном и

осевом направлениях соизмеримо. Применяются аналогично осевым насосам. Но при одинаковых объемных подачах имеют более высокое значение напора ($H_n = 10 \dots 40$ м).

По сравнению с поршневыми насосами (одинаковая мощность) лопастные насосы значительно легче и компактнее. В конструкции нет быстроизнашивающихся деталей, например, уплотнительных поршневых колец и клапанов. Достоинство - высокая равномерность подачи.

Вихревой насос - насос трения, состоит из рабочего колеса, лопаток и корпуса с кольцевым каналом, имеющим перемычку; широко применяются в системах водоснабжения.

Достоинств данного насоса много: компактность, простота конструкции, малая масса. Вихревой насос развивает напор в 1,5-2 раза больший, при таких же параметрах, чем центробежный, обладают лучшими всасывающими качествами. Значительный недостаток данного вида насосов - это низкое значение полного коэффициента полезного действия, варьируемое в пределах $\eta_n = 0,25-0,45$.

Вихревые насосы могут быть пригодны для перекачивания смесей жидкости и газа, сжиженных газов. Не подходят для перекачки жидкостей с большой вязкостью, так как увеличение вязкости снижает коэффициент полезного действия ещё сильнее.

Струйный насос не имеет подвижных частей, а рабочим органом является жидкость.

Струйный насос относится к эжекторным устройствам, два потока являются потоками одной и той же среды.

Недостатками эжекторов отмечены малый коэффициент полезного действия и незначительный напор. Впервые эжекторы были использованы при осушении болот.

Распределение насосов в зависимости от их напора H_n и объемной подачи Q_n представлен на рисунке 1.6 (в логарифмической сетке). По зависимости видно, что объемные насосы нашли применение при высоких

напорах и малом расходе. Противоположное относится к осевым насосам, работающих при малых напорах и высоких расходах. Для работы при средних расходах и напорах предпочитают использовать центробежные насосы.

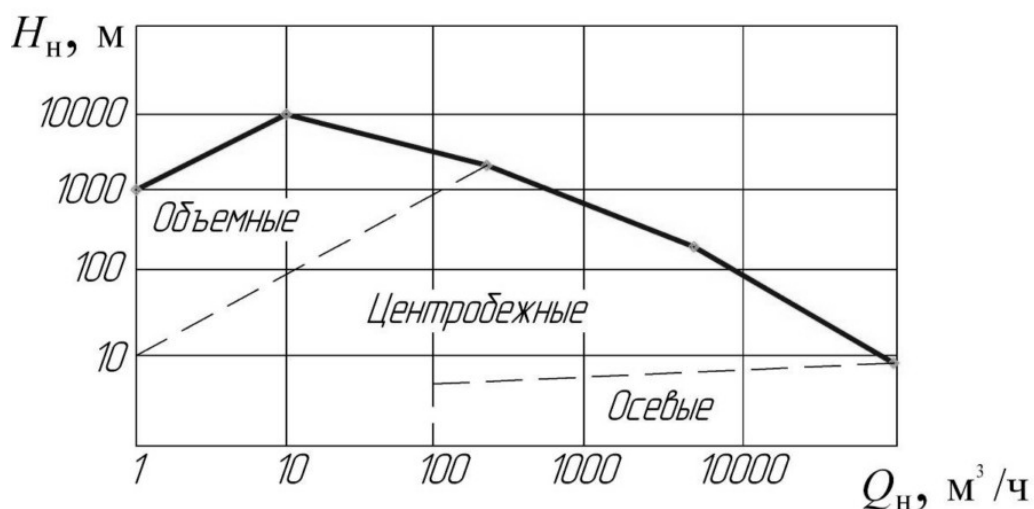


Рисунок 1.6 - Области применения насосов

Для транспортирования гидросмесей применяют центробежные насосы как наиболее удовлетворяющие агрегаты, обращая внимание на то, что насосы данной конструкции наиболее эффективно работают с переменными концентрациями, консистенциями, расходом и прочими особенностями пульпы.

1.3 Классификация гидросмесей

Транспортировка гидросмесей по трубопроводу вносит обычно изменение в структуру несущей жидкости в зависимости от крупности и концентрации частиц. В связи с разными условиями технологических процессов, определяют состав твердых частиц по крупности, содержанию их в гидросмеси и другие характеристики [47, 92].

С уменьшением крупности частиц твердого материала (100 мкм и менее) и в зависимости от вещественного состава могут обнаружиться новые свойства гидросмеси. При повышении концентрации твердой фазы гидродинамическое взаимодействие на границах твердой и жидкой фаз

снижается. При этом появится новое движение, вызванное физико-химическими процессами на границах фаз и воздействием на течение потока структурных связей. В соответствии с размером частиц можно классифицировать виды гидросмесей:

- коллоидные - размер частиц до 1 мкм;
- структурные - 1-50 мкм, полученные диспергированием;
- тонкодисперсные - 50-150 мкм, полученные измельчением;
- полидисперсные структурированные 0-3 мкм, полученные совместно диспергированием и измельчением.

Для технологических процессов характерны полидисперсные структурированные гидросмеси, в которых содержится около 60-70 тонкоизмельченных частиц с включением крупных (иногда кусковых) фракций. Они обычно состоят из мономинеральных, полиминеральных или органических частиц.

Гидросмеси при достижении критической концентрации твердых веществ проявляют вязко-пластичные свойства, обусловленные процессами структурообразования. Так как в работе исследования проводятся с высококонцентрированными гидросмесями, то для них можно использовать зависимость между упругими свойствами и их кажущейся вязкостью. Упругое напряжение τ (1.1), представляющее закон трения Шведова-Бингама, имеет вид:

$$\tau = \eta(du / dt) + \tau_0 , \quad (1.1)$$

где η - вязкость Па·с;

(du / dt) - изменение скорости во времени или градиент скорости, c^{-1} ;

τ_0 - предельное начальное напряжение сдвига, Па.

Вязкость η имеет для разных гидросмесей различное значение, ее величина зависит от вещественного состава твердых частиц.

Для однородных жидкостей эффективная вязкость (1.2)-(1.3)

$$\eta' = \tau(du / dy) \quad (1.2)$$

или

$$\eta' = \eta + \tau_0(du / dy) \quad (1.3)$$

где (du / dy) - изменение скорости по расстоянию между двумя параллельными между собой слоями по времени.

С возрастанием градиента скорости эффективная вязкость стремится к значению η для однородной жидкости. Величины η и η' по формуле Ньютона объединяют два отличных вида сопротивления среды и рассматриваются как условные параметры. По эффективной вязкости при движении высоконасыщенных гидросмесей можно оценить влияние твердой фазы на свойства гидросмеси.

Со стороны гидродинамики структурированные (высоконасыщенные) дисперсные системы имеют особенность - при большом количестве частиц в потоке активное положение занимает твердый компонент. Жидкость, находящаяся между твердой составляющей, переносится вместе с ней. Внутренние движения определяются перемещениями наподобие пластических деформаций твердого тела.

Большое значение в характеристике дисперсных систем имеет степень молекулярного сродства или молекулярного взаимодействия жидкой и твердой фаз на границе их раздела.

Величина краевого угла смачивания также является важнейшей характеристикой. Угол определяет соотношение между силой сцепления молекул жидкости и твердого вещества. Тела с малыми углами смачивания жидкостью называют гидрофильными (лиофильными), а с большими углами смачивания - гидрофобными (лиофобными).

Большая поверхность границы раздела жидкость - твердая фаза способствует появлению поверхностной энергии, которая образуется из-за различной интенсивности взаимодействия молекул на границе раздела фаз. Величина данного взаимодействия определяется сольватированностью

поверхности твердых частиц.

Лифобные дисперсные системы определяются слабым молекулярным взаимодействием частиц дисперсной и жидкой фаз, твердые частицы не захватываются в прочную сольватную оболочку, поэтому такие системы неустойчивы - твердые частицы слипаются и осаждаются.

К основному качественному отличию ньютоновских жидкостей и структурированных дисперсных систем относится способность оказывать начальное сопротивление сдвигу, которая является свойством твердых тел.

Гранулометрический состав твердой фазы, геометрические размеры единичных частиц материала с указанием массовой доли частиц, - одна из основных физико-механических характеристик гидросмеси, конечный результат диспергирования или измельчения, а в некоторых технологических процессах - результат сушки или прокаливания.

Существенной характеристикой гидросмеси является концентрация твердой фазы в жидкости. Концентрация гидросмеси - степень насыщенности занимаемого гидросмесью объема твердым веществом. Концентрация выражается массовыми или объемными соотношениями. Объемная концентрация (1.4) выражается отношением объема твердых частиц в плотном теле к объему гидросмеси

$$c = \frac{\rho_{см} - \rho_в}{\rho_{тв} - \rho_в}, \quad (1.4)$$

где $\rho_{см}$, $\rho_в$, $\rho_{тв}$ - плотности гидросмеси, жидкости (воды) и твердой фазы соответственно, кг/м³.

Массовая концентрация (1.5) представляет собой отношение массы твердого вещества к массе всего объема и определяется по формуле

$$c_1 = c \frac{\rho_{см}}{\rho_{тв}}. \quad (1.5)$$

Условия гидродинамического взаимодействия твердых частиц с потоком жидкости выражаются гидравлической крупностью частиц. Это скорость свободного падения твердых частиц в спокойной жидкости,

определяемая крупностью, массой и формой частиц. Для очень мелких частиц сопротивление жидкости их падению пропорционально скорости падения в первой степени (ламинарный режим обтекания). С увеличением размеров частиц показатель возрастает до двух (турбулентный режим обтекания). Есть и промежуточные формы сопротивления [64].

Гидросмеси могут быть в зависимости от условий их разделения в статическом положении стабильными и нестабильными. Дисперсные системы устойчивы при движении гидросмеси в потоке.

Показателем стабильности (устойчивости) является скорость седиментации. Седиментационный объем (объем осадка) характеризует различие между устойчивыми коагуляционными суспензиями. Оседание частиц в устойчивой суспензии происходит медленно.

1.4 Гидротранспорт высококонцентрированных смесей

Эффективность систем гидротранспорта определяется скоростью транспортирования и концентрацией твердой фазы.

Вопросы эффективности и экономичности транспортировки пульпы с получением расчетных зависимостей параметров гидротранспорта, влияния твердой фракции на взвесенесущий поток рассматривались со второй половины XX века. Этими проблемами занимались Юфин А.П., Смолдырев А.Е., Покровская В.Н., Александров В.И. и др., в чьих работах описана теория гидротранспортирования смесей с разной концентрацией [3, 13, 23, 69, 70, 80, 83-86, 89, 90, 93, 97]. В работах проф. Александрова В.И. рассмотрены режимы течения пульпы при высоких концентрациях с рекомендациями в применении к конкретным условиям эксплуатации на горно-обогатительных предприятиях.

Известно, что в потоке смесей образуются вихри разных форм, обладающие энергией. Твердые частицы влияют на структуру потока и, как следствие, его турбулентные характеристики. Определено, что турбулентность с включением однородных частиц практически такая же, как

для чистой жидкости, и при высоких скоростях течения изменение турбулентности отсутствует. В потоке, в состав которого включены неоднородные по крупности частицы, возникают дополнительные вихри. В таком случае учитывается масштаб потока гидросмеси, который определяется отношением усредненного диаметра частицы к диаметру пульпопровода.

Гидравлические сопротивления зависят от содержания твердой фазы в потоке пульпы. Если увеличивается процент твердых частиц, то и возрастает сопротивление. Это происходит в связи с тем, что возрастает число столкновений частиц в потоке смеси. Скорость мелких частиц можно сопоставить со скоростью жидкости, а трение при движении крупных частиц различной крупности возрастает. Частицы, находящиеся в разных слоях по расположению в трубопроводе, сталкиваются между собой, соответственно, число столкновений тем больше, чем выше концентрация пульпы. При этом теряется энергия потока в целом.

1.5 Влияние параметров гидросмеси на режим работы системы «насос-трубопровод»

Центробежный насос в системах гидротранспорта пульп 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 (мощность, КПД, напор, расход) [24].

Действующие и проектируемые системы гидротранспорта сыпучего материала, например, хвостов обогащения минерального сырья к закладочному комплексу, рассчитываются по номинальным параметрам, таким как, средний гранулометрический состав твердой фазы, концентрация твердого в объеме пульпы, расход гидросмеси [10, 36, 76, 87]. Однако

практика показывает, что эти характеристики изменяются во времени по целому ряду технологических причин: плановые остановки на ремонт и обслуживание, 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 пенного продуктов при флотации из-за изменяющегося состава реагентов, человеческий фактор, и др. В итоге, в конце технологического процесса обогащения, на гидротранспортный передел поступает пульпа со значительными отклонениями параметров от номинальных или расчетных.

Основной величиной, определяющей эффективность гидравлического транспортирования, являются удельные потери напора (1.6), которые обычно для гидросмеси можно представить функцией вида

$$i_h = i_w + \Delta i, \quad (1.6)$$

где i_h - потери напора при транспортировании гидросмеси, м;

i_w - потери напора на транспортирование чистой воды, м;

Δi - дополнительные потери напора, расходуемые на транспортирование твердой фазы гидросмеси, м.

Формула (1.6) выражает собой лишь качественную сторону процесса, но не раскрывает количественную, так как каждый из составляющих этой формулы зависит от конкретных условий, определяемых видом и типом транспортируемой гидросмеси. При отклонении характеристик гидросмеси от номинальных изменяется и сам вид смеси, которая, например, при увеличении содержания твердых частиц, может перейти из разряда ньютоновских жидкостей в разряд неньютоновских, течение которых описывается отличными по сути величинами.

В связи с этим необходимо выполнить анализ закономерностей изменения энергетических затрат и используемых расчетных формул для гидросмесей хвостов обогащения с разными, определяемыми технологией обогащения, параметрами твердой фазы: гранулометрического состава,

концентрации, вязкости, напряжений сдвига и других характеристик. Система гидротранспорта работает эффективно, если рабочая точка отклоняется на 5-10 % от номинала.

На рисунке 1.7 приведены характеристики работы системы «насос-трубопровод» по расходу и напору при изменении концентрации перекачиваемой гидросмеси. Рабочая точка A , имеющая значения напора H_A и расхода Q_A при номинальном режиме, переходит в другие положения. При уменьшении расхода (из-за увеличения содержания твердого материала) напор возрастает, а частота вращения колеса насоса уменьшается. При увеличении расхода (уменьшение количества твердой фазы) напор падает, а частота вращения насоса увеличивается. При отсутствии действий по регулированию расхода и напора, расходно-напорная характеристика трубопровода не будет отвечать необходимым требованиям, что повлияет на увеличение расхода энергии, удельной энергоемкости, что в итоге приведет к неэффективности использования гидравлического транспортирования.

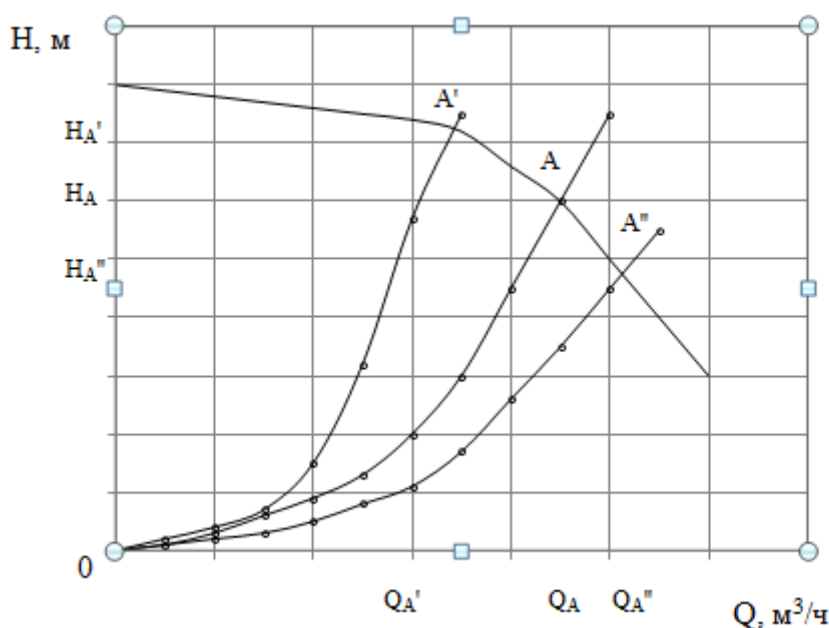


Рисунок 1.7 - Гидромеханические характеристики насоса в системе гидротранспорта

Площади под характеристиками трубопровода показывают, каково потребление энергии в системе гидротранспорта. По этому значению

определяют эффективность выбранного способа регулирования режима гидравлического транспортирования. Рабочая точка А меняет положение в диапазоне от А' да А'', и ее отклонение не должно превышать 5 % для наиболее эффективного режима работы.

1.6 Зависимость удельных потерь напора от концентрации твердой фазы и плотности гидросмеси

При транспортировании того или иного материала с некоторой заданной скоростью по горизонтальным трубам потери напора возрастают с увеличением концентрации твердого материала. Только в безнапорных потоках при транспортировании мелких материалов в области незначительных концентраций с их увеличением сопротивление в некотором диапазоне уменьшается, а при дальнейшем увеличении концентрации начинает возрастать. Это явление объясняется ламинаризирующим эффектом мелких частиц и уменьшением шероховатости стенок потока при наличии в потоке мелких частиц, способных заполнить пространство между выступами шероховатости. К этому также добавляется эффект силы тяжести, преобладающий над эффектом силы трения.

Рост концентрации твердого материала в объеме гидросмеси может особым образом повлиять на значение критических скоростей. Так при исследовании гидротранспорта мелкого, истертого в пыль в результате длительного транспортирования по замкнутому кольцевому трубопроводу угля А.П. Юфин получил следующее: критическая скорость возрастает до некоторого значения концентрации, а затем начинает уменьшаться. При максимальном значении плотности, с которой проводился эксперимент, критическая скорость стала равной нулю, с прекращением движения гидросмесь не расслаивалась на жидкую и твердую фазы.

В области малых концентраций твердого материала определяющим параметром эффективности режима является критическая скорость потока.

Величина критической скорости определяет значение удельных потерь напора и, следовательно, затраты мощности на гидравлический транспорт по трубопроводу длиной L .

Из предыдущего изложения следует, что в процессе гидравлического транспортирования хвостов обогащения полиметаллических руд параметры потока пульпы могут изменяться в связи с изменением содержания твердых частиц материала в транспортируемой жидкости. При минимальном содержании твердых частиц гидросмесь по своим свойствам мало отличается от обычных ньютоновских жидкостей, сопротивления движению которых описываются соответствующей реологической моделью Ньютона (1.7)

$$\tau_w = \mu \frac{dv}{dr}, \quad (1.7)$$

где τ_w - касательное напряжение сдвига, возникающее на стенке трубопровода, Па;

μ - динамический коэффициент вязкости, Па·с;

$\frac{dv}{dr}$ - изменение скорости течения в сечении трубопровода, характеризующееся эпюрой скорости, с^{-1} .

С увеличением концентрации реологические свойства гидросмеси изменяются. При достаточно высоком содержании твердой фазы гидросмесь из ньютоновской переходит в неньютоновскую, приобретая вязкопластические свойства. Такие смеси отличаются от обычных вязких выраженным значением начального напряжения сдвига. Реологическая модель описывается законом Шведова-Бингама (1.8):

$$\tau_w = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dr}, \quad (1.8)$$

где τ_0 - начальное напряжение сдвига, возникающее в потоке смеси при начале движения, Па.

Из модели Шведова-Бингама следует, что при $\tau_0 = 0$ смесь можно отнести к ньютоновским жидкостям, при τ_0 не равном нулю, смесь является

неньютоновской.

Обобщенной функцией изменения сопротивлений при течении гидросмесей различной концентрации можно принять модель Шведова-Бингама, а определяющим критерием - величину начального напряжения сдвига τ_0 .

Учитывая наклон, протяженность трубопровода и его диаметр, сопротивление о стенки трубопровода, скорость движения, получаем формулу для нахождения удельных потерь напора (1.9) для неопределенной жидкости

$$i = \lambda_{np} \frac{v^2}{2gD}, \quad (1.9)$$

где λ_{np} - коэффициент гидравлических сопротивлений для потока жидкости:

v - скорость потока жидкости, м/с;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

D - площадь сечения трубопровода, мм².

Для расчета удельных потерь напора при транспортировке пульпы необходимо принимать во внимание концентрацию гидросмеси. Таким образом, формула преобразуется в вид (1.10)

$$i = \lambda_{np} \frac{v^2}{2gD} \frac{\rho_{см}}{\rho_{тв}}, \quad (1.10)$$

где $\rho_{см}$, $\rho_{тв}$ - плотности гидросмеси и твердой фазы соответственно, кг/м³.

Данная формула дает более точные расчеты, если твердые частицы в гидросмеси одинаковой крупности, а жидкость можно считать однородной.

1.7 Виды регулирования грунтового насоса в системе гидротранспорта

Байпасирование. Регулирование потока пульпы с определенным ее расходом осуществляется путем шунтирования части, перекачиваемой из напорного трубопровода во всасывающий по перепускному трубопроводу.

Если требуется уменьшить подачу в систему, открывают клапан на

перепускном трубопроводе. За счет введения параллельной основной линии трубопровода суммарная характеристика сети станет более пологой и общая подача насоса увеличится. При этом по байпасной линии будет циркулировать весь расход, а в сеть поступать необходимый расход. Напор, развиваемый насосом, и мощность уменьшаются до требуемых величин.

Данный способ регулирования более экономичен для насосов, потребляемая мощность которых при росте подачи уменьшается. Это отрицательно сказывается при регулировании на центробежные насосы, так как с ростом мощности насоса и электродвигатель может быть перегружен. Перепускаемый с напорной стороны во всасывающую поток жидкости обладает некоторой энергией.

Дросселирование. Этот способ заключается в гашении части напора, создаваемого насосом, искусственно вводимым в напорную или всасывающую линию гидравлическим сопротивлением.

Обычно дросселирование производят частичным закрытием задвижки на напорном трубопроводе насоса. Данный способ наиболее прост и распространен. Но минусом этого способа является неэкономичность из-за траты напора, который преодолевает сопротивления заслонки. При этом имеются потери мощности. Постоянная замена заслонок тоже относится к минусам, теряется при этом мощность.

При смещении рабочей точки либо приоткрывают задвижку, либо прикрывают с целью вернуть работу насоса к максимальному коэффициенту полезного действия.

Метод регулирования всасывающей задвижкой экономически более целесообразен, чем регулирование с помощью напорной задвижки, но при таком методе требуется поддерживать высоту всасывания, меньше предельной для обеспечения нормальной работы насоса. Прикрывая задвижку на всасывающей трубе, наблюдают увеличение разряжения в трубе, что соответствует увеличению высоты всасывания. Увеличение высоты всасывания вызывает кавитацию. Кавитация является неблагоприятным фактором при эксплуатации любых

агрегатов и аппаратов. Из-за данного явления работа насоса становится неустойчивой, возникает серьезная опасность срыва работы насоса. Если по условиям всасывания допустимо регулирование всасывающей задвижкой, надежнее применить комбинированное регулирование при помощи всасывающей и напорной задвижек.

Введение воздуха. При впуске воздуха происходит смещение вниз характеристики $Q-H$ насоса, поэтому можно подобрать режим работы насоса, соответствующий условиям подачи заданного расхода Q .

При впуске воздуха коэффициент полезного действия насосной установки снижается тем больше, чем больше воздуха впускается в насос, происходит рост отношения объема воздуха к объему жидкости. Впуск воздуха при небольших изменениях подачи (не менее 0,7 от номинальной) является более выгодным, чем дросселирование. Существенный недостаток такого регулирования заключается в неустойчивой работе насоса при наличии воздуха в рабочем колесе, создается опасность разрыва водяного столба во всасывающей линии и срыва работы насоса.

Подрезка (обрезка, обточка рабочего колеса). В рабочем процессе приходится приспособлять характеристики насосов к конкретным условиям. Для этого часто уменьшают наружный диаметр рабочего колеса путем подрезки. Изменение параметров насоса при подрезке рабочих колес для центробежных насосов приближенно находится по уравнениям подобия.

Обрезку рабочего колеса центробежных насосов также можно производить по ширине. Напор сохраняется постоянным, а подача снижается пропорционально уменьшению ширины лопатки. Практическая польза такой обрезки заключается в появлении возможности без изменения проточной части насоса повысить его напор на 5-8 % при почти неизменном коэффициенте полезного действия. Так же можно производить обрезку рабочего колеса насоса только по лопаткам. Выходная кромка рабочего колеса стачивается по длине, выходная площадь каналов рабочего колеса по периферии увеличивается. Проведенные эксперименты показали, что

увеличение площади выхода на 11,7 % позволило при наивысшем значении коэффициента полезного действия увеличить подачу на 16,7 % при сохранении неизменными мощности и напора. Недостаток данного способа - регулировать таким образом можно только один раз, обратная наплавка материала на лопасти нецелесообразна, поэтому придется менять полностью колесо.

Изменение частоты вращения рабочего колеса. Способ частотного регулирования гораздо эффективнее остальных вышерассмотренных с точки зрения экономичности потребления ресурсов.

При изменении частоты вращения рабочего колеса насоса с n_1 до n_2 его характеристики $Q-H$ изменяются по закону подобия.

Во всех режимах работы напор насоса равен сопротивлению сети, поэтому сокращаются непроизводительные потери в системе «насос-сеть». Экономичность при регулировании насосов таким способом снижается в том случае, когда рабочая точка системы при изменении числа оборотов n отклоняется от режима максимального коэффициента полезного действия. Это отклонение увеличивается, если возрастает статическая составляющая сопротивления сети.

В основном насосы имеют привод от асинхронных короткозамкнутых электродвигателей. Минусом является регулирование насоса в зависимости от возможного диапазона частоты вращения двигателя.

На основании выше изложенного можно сказать, что для системы гидротранспорта наиболее рациональным является выбор центробежного насоса и способа его регулирования с помощью частотного преобразователя [63].

1.8 Выводы по первой главе

На основании проведенного анализа, были сделаны следующие выводы, поставлены цель и задачи исследования:

1. Транспортирование пульпы к закладочным комплексам является

важным вопросом, однако не на всех предприятиях используются достаточно эффективные способы регулирования при ее перекачивании.

2. Существует несколько схем комплексов получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения, в которых либо не включено насосное оборудование для пульпы, либо не достигается поддержание номинального коэффициента полезного действия при регулировании.

3. В существующих методах регулирования не учитывается концентрация твердой фазы по массе, только по объему перекачиваемой жидкости, что влияет на экономичность и технологичность процесса.

4. Применение комбинированного способа регулирования насосного оборудования комплекса получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения, включающего регулирование насоса частотным способом и введение байпасных линий по твердому веществу и воде, соответственно, является эффективным.

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

Задачи исследования:

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

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

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

4. Дать рекомендации по осуществлению комбинированного регулирования насосного агрегата закладочного комплекса получения

закладочных смесей из текущих хвостов обогащения.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГРУНТОВЫХ НАСОСОВ ПРИ ГИДРОТРАНСПОРТЕ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

2.1 Зависимость КПД насоса при изменяющейся концентрации

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 количество твердого вещества в пульпе из комплекса сгущения, функционирующего параллельно грунтовому насосу с питанием от того же потока текущих хвостов обогащения. В работах [4, 12, 20, 21, 26, 29, 32, 39, 52-55, 59, 72, 98-107] приведены сведения по расчету насосного оборудования, двигателя и привода, включенных в схему комплекса закладки, представленную в данной работе.

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

Формула для напора (2.1) насоса имеет вид

$$H_n = H_{n0} - r_{n1}Q - r_{n2}Q^2, \quad (2.1)$$

где H_{n0} - статический напор насоса напор холостого хода, м;

r_{n1} , r_{n2} - коэффициенты, учитывающие потери напора в насосе.

Для определения коэффициентов уравнения (2.1) была написана программа на языке Scilab.

Данная программа производит аппроксимацию методом наименьших квадратов численно-заданной характеристики насоса, выводит график полученной аппроксимировано зависимости и исходные точки. Также программа позволяет получить искусственные характеристики насоса при различных значениях скорости вращения в диапазоне 10-100 % от номинальной скорости. Расчет ведется на основании известных законов подобия. Коэффициенты

аппроксимирующего полинома выводятся в рабочее пространство Scilab. Пример расчета для насоса ГрАТ/225/67/3-2,2 приведен ниже.

Насосы типа ГрАТ относятся к центробежным горизонтальным одноступенчатым консольным насосам с односторонним подводом гидросмеси к рабочему колесу. Выполняются двухкорпусными. Наружный корпус изготавливается из серого чугуна СЧ20 или стали в зависимости от требований заказчика, а внутренний корпус - из высокохромистого износостойкого чугуна ИЧХ28Н2. Всасывающий патрубок данной модели расположен на оси насоса, нагнетательный патрубок - вертикально вверх. Если есть необходимость, расположение патрубка может меняться с шагом в 30°. Выбранный насос ГрАТ/225/67/3-2,2 имеет следующие характеристики, заявленные заводом-изготовителем. Подача 225 м³/ч, напор 67 м, плотность перекачиваемой гидросмеси 2200 кг/м³, температура перекачиваемой смеси в пределах от 5 °С до 70 °С, диаметр рабочего колеса 430 мм, габаритные размеры 3195х930х1215 мм, масса 3405 кг.

Выражая из (2.1) напор насоса (2.2)-(2.5) с учетом уравнений, получим (величины со штрихом соответствуют искусственной характеристике, а без штриха - естественной)

$$H'_n = H'_{n0} - r'_{n1}Q - r'_{n2}Q^2, \quad (2.2)$$

$$H'_{n0} = \frac{H_{n0}}{n_n^2} n^2, \quad (2.3)$$

$$r'_{n0} = \frac{r_{n1}}{n_n} n, \quad (2.4)$$

$$r'_{n2} = r_{n2}, \quad (2.5)$$

где n - номинальная частота вращения.

Уравнениям (2.2)-(2.5) соответствует следующая имитационная модель (рисунок 2.1) в XcosScilab.

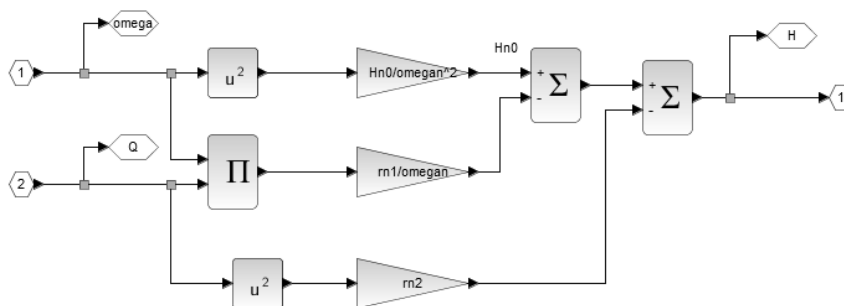


Рисунок 2.1 - Модель насоса, собранная в программе Scilab для расчета напора

Для моделирования процессов в трубопроводе при изменении гидравлического сопротивления нагрузки была создана модель (рисунок 2.2), включающая в себя программу инициализации Scilab и модель в Xcos.

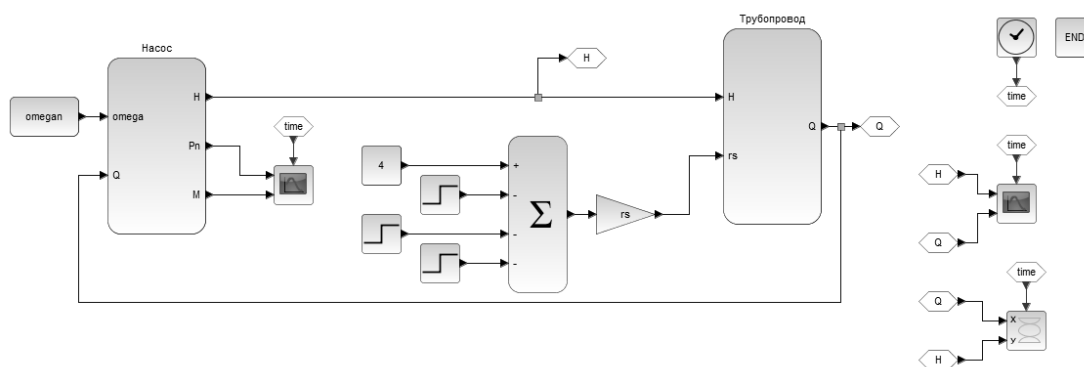


Рисунок 2.2 - Моделирование процессов, происходящих в трубопроводе при переменной нагрузке

Математическая модель гидродинамической характеристики центробежного насоса может быть аппроксимирована полиномом второго или третьего порядка [46].

Характеристики, показывающие как меняются расход и напор при частотах скоростях вращения в диапазоне 10-100 % от номинальной скорости для насоса ГрАТ/225/67/3-2,2 имеют вид и представлены на рисунке 2.3.

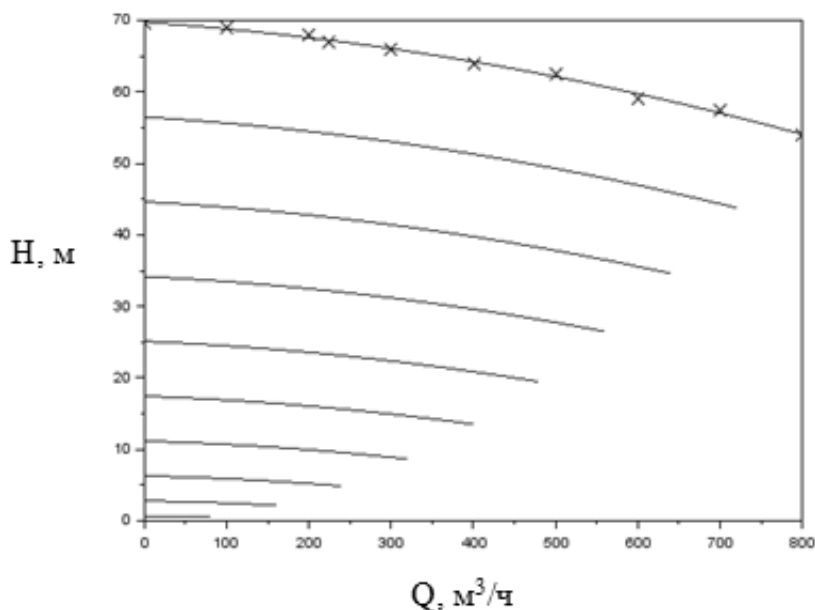


Рисунок 2.3 - Характеристики насоса ГрАТ/225/67/3-2,2

Как видно из графиков, частотное регулирование позволяет снизить эксплуатационные затраты, связанные с обслуживанием, ремонтом или заменой агрегатов, приводя его режим работы к номинальному либо в разрешенном диапазоне отклонения рабочей точки не более 5-10 %.

2.2 Модель насосного агрегата с регулированием по изменяющимся параметрам, имитирующим концентрацию и вязкость

При имитационном моделировании были применены коэффициенты (2.6)-(2.8) для регулирования скорости вращения [46], равные

$$a'_2 = a_2, \quad (2.6)$$

$$a'_1 = a_1 \frac{n'}{n}, \quad (2.7)$$

$$a'_0 = a_0 \left(\frac{n'}{n} \right)^2. \quad (2.8)$$

Для вычисления механической мощности и момента сопротивления, показанной схемы на рисунке 2.1, создаваемого насосом, воспользуемся известными соотношениями (2.9)-(2.11). Мощность равна

$$P_n = \frac{1}{3600} \frac{\rho g H Q}{\eta}, \quad (2.9)$$

$$P_n = M n, \quad (2.10)$$

$$M = \frac{P_n}{n}, \quad (2.11)$$

где ρ – плотность перекачиваемой смеси, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H – напор, м;

Q – расход, м³/с,

M – момент силы, кг·м²/с²;

n – частота вращения, с⁻¹.

Уравнениям (2.9) и (2.11) соответствует следующая модель, представленная на рисунке 2.4.

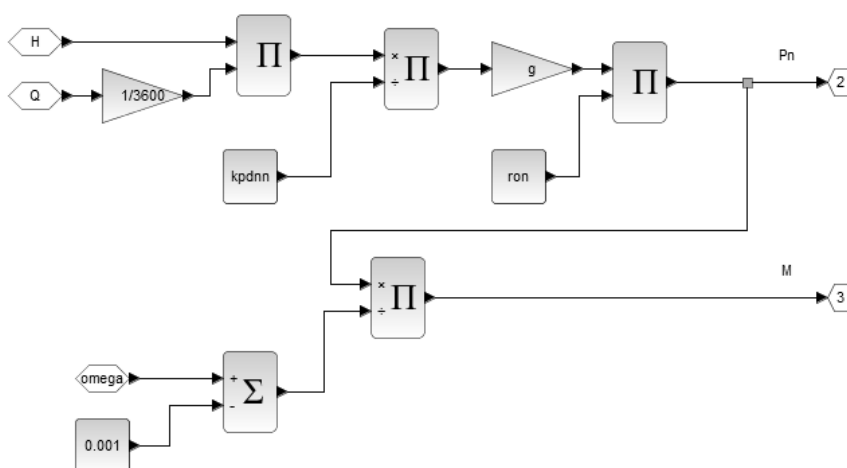


Рисунок 2.4 - Модель насоса, собранная в программе Scilab для определения механической мощности и момента

Вместе собранные выше представленные модели образуют модель насоса, рассматриваемого как источник напора, влияние нагрузки трубопровода на который моделируется помощью соответствующей обратной связи (рисунок 2.5).

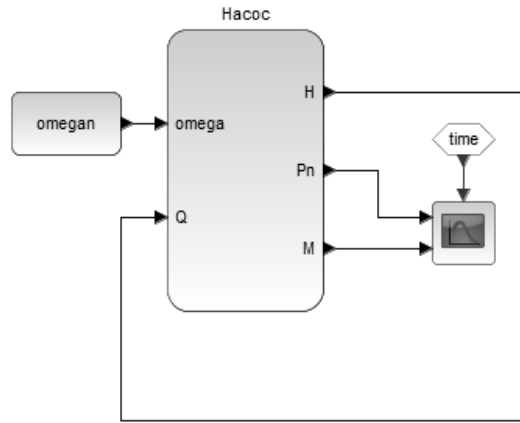


Рисунок 2.5 - Модель насоса, собранная в программе Scilab

Гидродинамическая характеристика трубопровода может быть описана следующим уравнением (2.12)

$$H_c = H_{c0} + r_c Q^2, \quad (2.12)$$

где левое слагаемое соответствует статическому напору, а правое - динамическому.

Так как система «насос-трубопровод» охвачена обратной связью и не содержит постоянных времени, не считая механической постоянной времени насоса $T_m = J_{н.дв} + J_{н.пр}$, то непосредственное моделирование по формуле (2.12) совместно с моделью насоса, приведенной выше, невозможно, так как возникает так называемая «алгебраическая петля». Чтобы этого избежать, можно использовать неявный решатель или внести в уравнение дополнительную постоянную времени T_c . Последнее не окажет значительного влияния на динамику системы при условии $T_c \ll T_m$, однако значительно упростит моделирование. Тогда уравнение (2.12) примет вид (2.13)

$$H_c = H = H_{c0} + r_c Q^2 + T_c \frac{dQ}{dt}. \quad (2.13)$$

Из выражения (2.13) получаем (2.14) в операторной форме

$$Q = \frac{1}{T_c s} (H_{c0} - H_c - r_c Q^2). \quad (2.14)$$

Здесь коэффициент r_c определяется выражением (2.15)

$$r_c = \frac{H_c - H_{c0}}{Q^2} \quad (2.15)$$

Выражению (2.15) соответствует следующая модель в Scilab (рисунок 2.6).

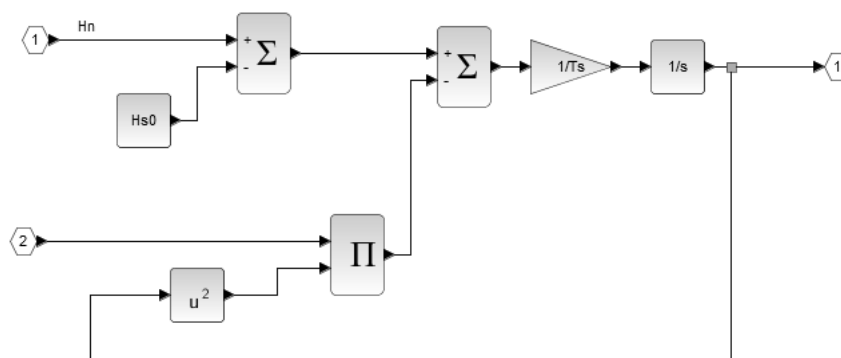


Рисунок 2.6 - Модель трубопровода, собранная в программе Scilab для расхода

Выход 2 задает динамическое сопротивление трубопровода. Входным сигналом является напор, а выходным - расход.

В результате моделирования процессов в трубопроводе при изменении гидравлического сопротивления нагрузки, представленных на рисунке 2.2, получены следующие характеристики (рисунки 2.7-2.10), аналогичные гидродинамической характеристике насоса, приведенной ранее.

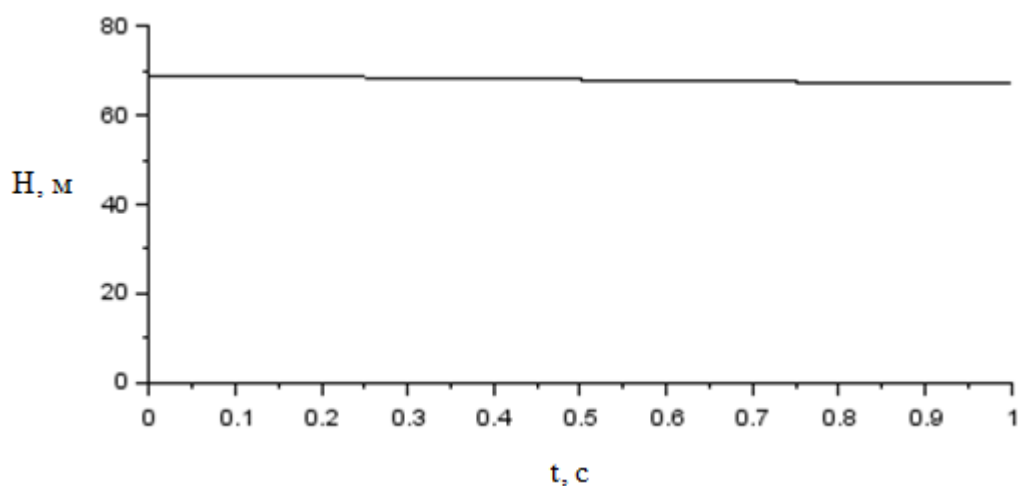


Рисунок 2.7 - Характеристика напора

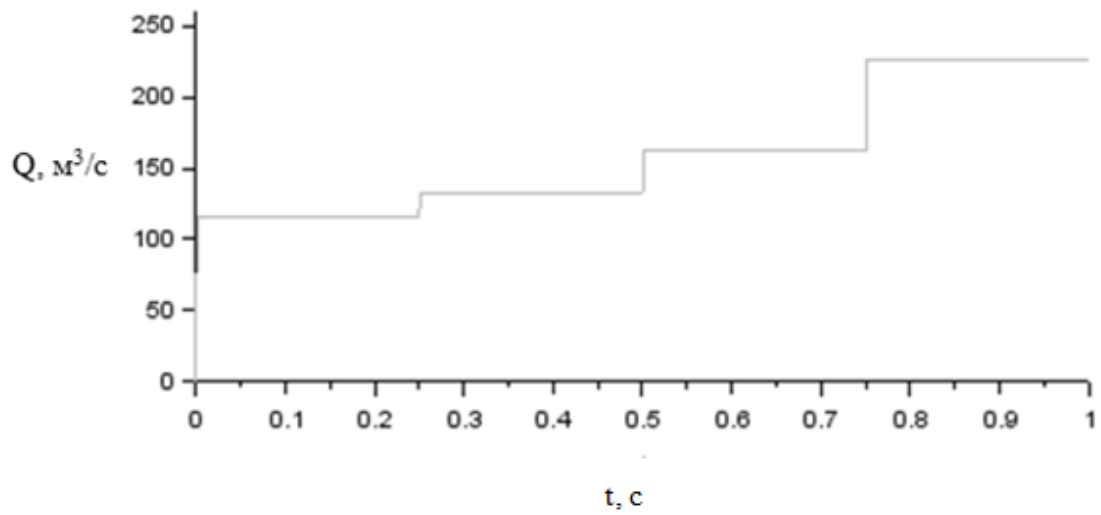


Рисунок 2.8 - Характеристика расхода

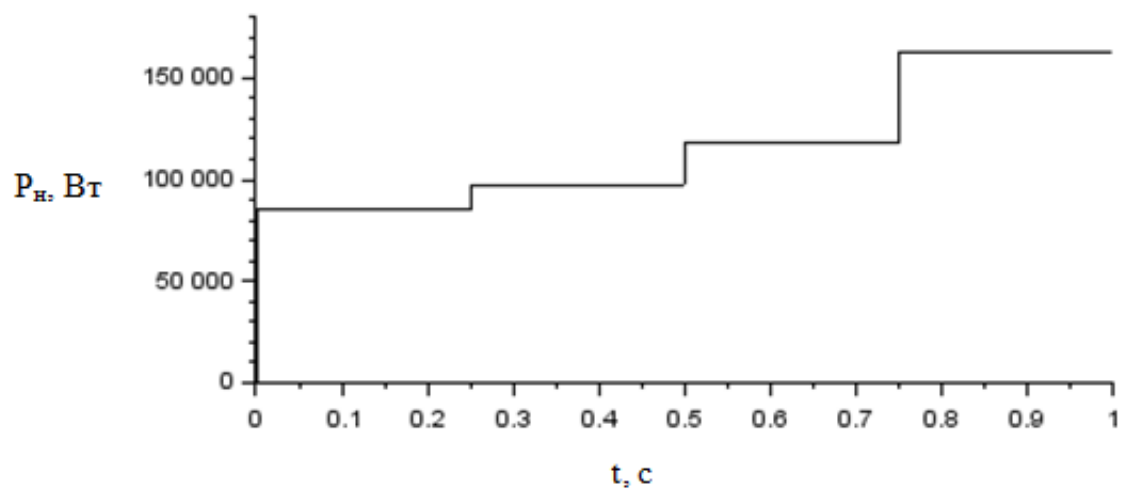


Рисунок 2.9 - Характеристика мощности

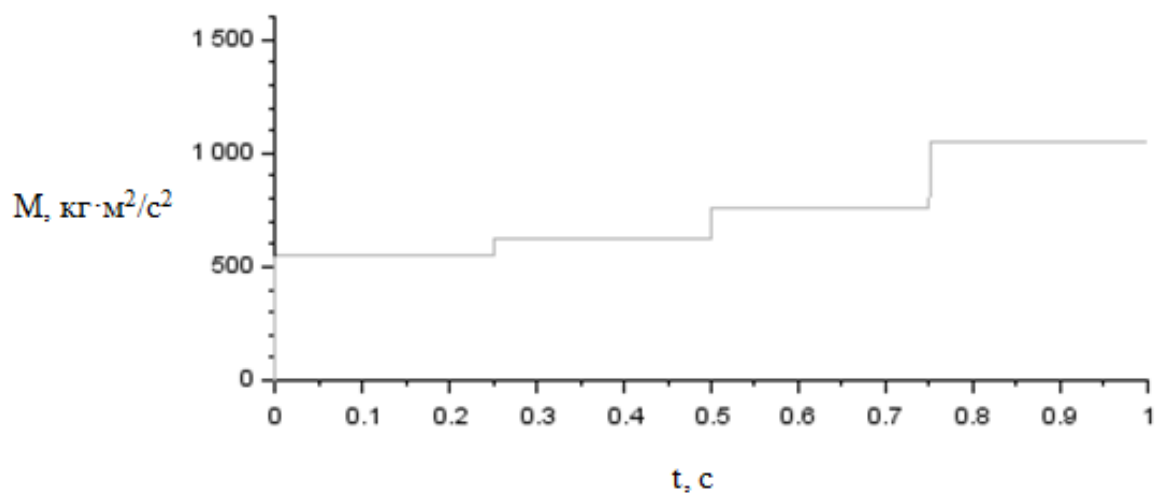


Рисунок 2.10 - Характеристики мощности и момента

Собранная модель оказалась работоспособной, поэтому с ней

проводилось дальнейшее имитационное моделирование.

2.3 Обоснование выбора частотного регулирования с введением байпасных линий в систему комплекса закладочных смесей из текущих хвостов обогащения

Передаточные функции звеньев, моделирующих идеальный преобразователь частоты (ПЧ), представленный на рисунке 2.11, в координатах $\alpha - \beta$, имеют вид (2.16 - 2.17)

$$W_1(s) = \frac{n_0^2}{s^2 + n_0^2}, \quad (2.16)$$

$$W_2(s) = \frac{n_0 s}{s^2 + n_0^2}. \quad (2.17)$$

Соответствующие им характеристики передачи (2.18)

$$\begin{cases} h_1(t) = 1(t)(1 - \cos n_0 t) \\ h_2(t) = 1(t) \sin n_0 t \end{cases}. \quad (2.18)$$

Составляющие амплитуды напряжения статора по координатам $\alpha - \beta$ (2.19)

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = U_m (1 - h_1(t)) \\ U_{s\beta} = U_m h_2(t) \end{cases}. \quad (2.19)$$

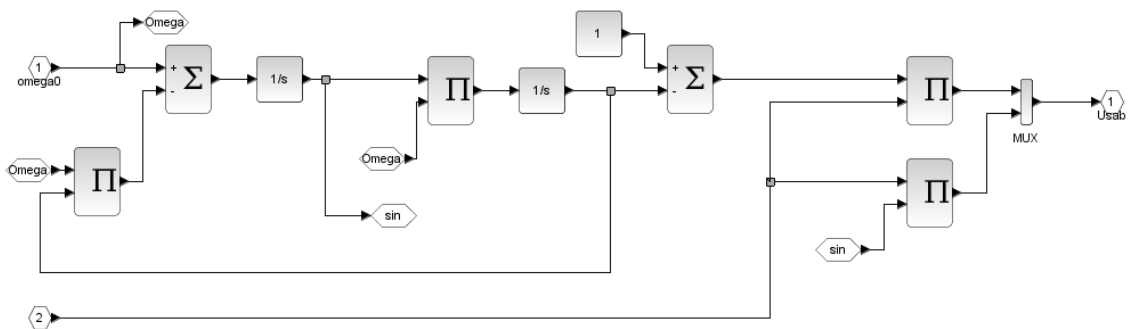


Рисунок 2.11 - Модель преобразователя частоты

Асинхронный электродвигатель в неподвижной двухфазной системе координат $\alpha - \beta$, ось α которой совмещена с осью фазы A , описывается следующими уравнениями (2.20)-(2.30)

$$U_{s\alpha} = R(1 + T'_s s)I_{s\alpha} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\alpha} - K_r p n \psi_{r\beta}, \quad (2.20)$$

$$U_{s\beta} = R(1 + T'_s s)I_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\beta} + K_r p n \psi_{r\alpha}, \quad (2.21)$$

$$0 = -K_r R_r I_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\alpha} + p n \psi_{r\beta}, \quad (2.22)$$

$$0 = -K_r R_r I_{s\beta} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\beta} + p n \psi_{r\alpha}, \quad (2.23)$$

$$M = \frac{3}{2} p K_r (\psi_{r\alpha} I_{s\beta} - \psi_{r\beta} I_{s\alpha}), \quad (2.24)$$

$$J s n = M - M_c, \quad (2.25)$$

где

$$K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad (2.26)$$

$$K_r R = (R_s + K_r^2 R_r), \quad (2.27)$$

$$L'_s R = L_s - L_m, \quad (2.28)$$

$$T_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad (2.29)$$

$$T'_r = \frac{L'_s}{R}. \quad (2.30)$$

Коэффициенты в уравнениях (2.20)-(2.30) соответствуют Т-образной схеме замещения асинхронного двигателя в абсолютных единицах (рисунок 2.12).

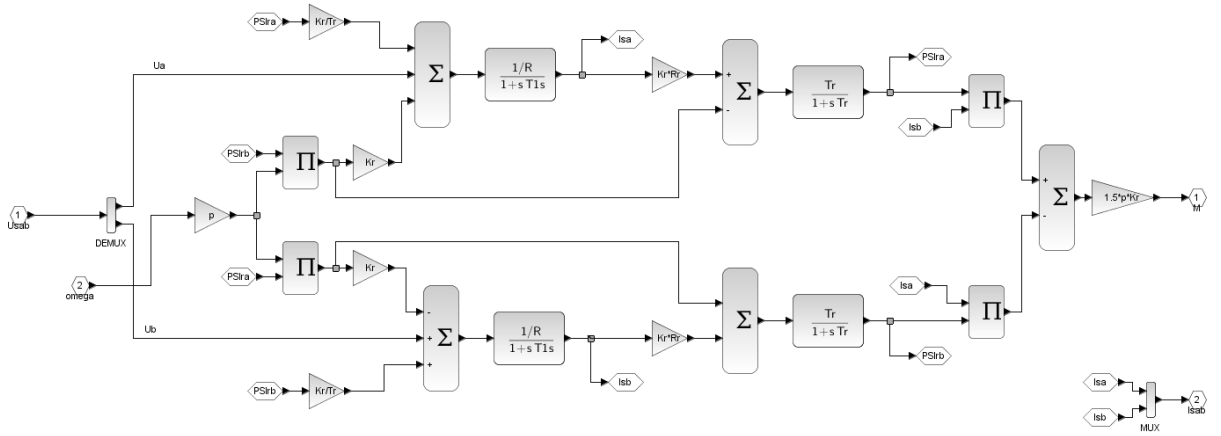


Рисунок 2.12 - Т-образная схема замещения асинхронного двигателя в абсолютных единицах

Моделирование преобразователя координат происходит следующим образом. Выражения (2.31)-(2.34) для расчета и рисунки (2.13)-(2.16) представлены ниже.

Из ABC в $\alpha - \beta$:

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = I_{sA} \\ I_{s\beta} = \frac{I_{sB} - I_{sC}}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (2.31)$$

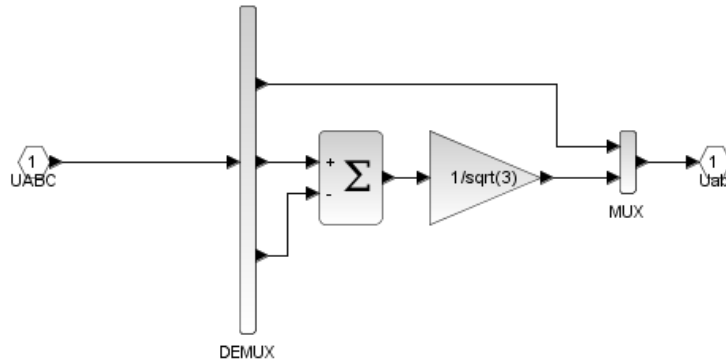


Рисунок 2.13 - Модель преобразователя координат ABC в $\alpha - \beta$

Из $\alpha - \beta$ в ABC:

$$\begin{cases} I_{sA} = I_{s\alpha} \\ I_{sB} = -\frac{1}{2}I_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{s\beta} \\ I_{sC} = -\frac{1}{2}I_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}I_{s\beta} \end{cases} \quad (2.32)$$

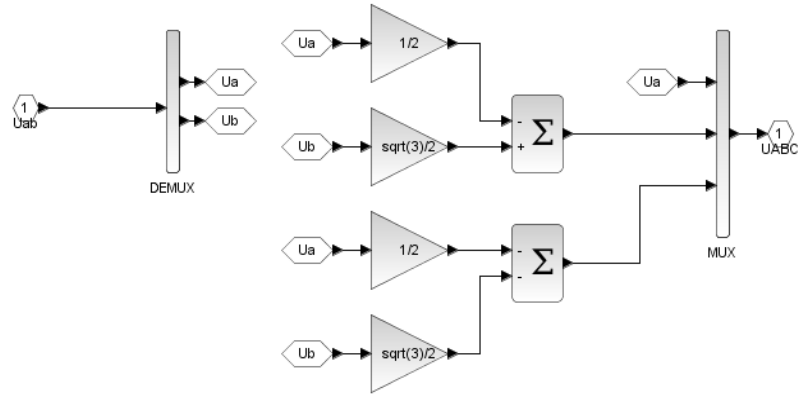


Рисунок 2.14 - Модель преобразователя координат из $\alpha - \beta$ в ABC

Из $\alpha - \beta$ в $d-q$

$$\begin{cases} I_{sd} = I_{s\alpha} \cos \gamma + I_{s\beta} \sin \gamma \\ I_{sq} = -I_{s\alpha} \sin \gamma + I_{s\beta} \cos \gamma \end{cases} \quad (2.33)$$

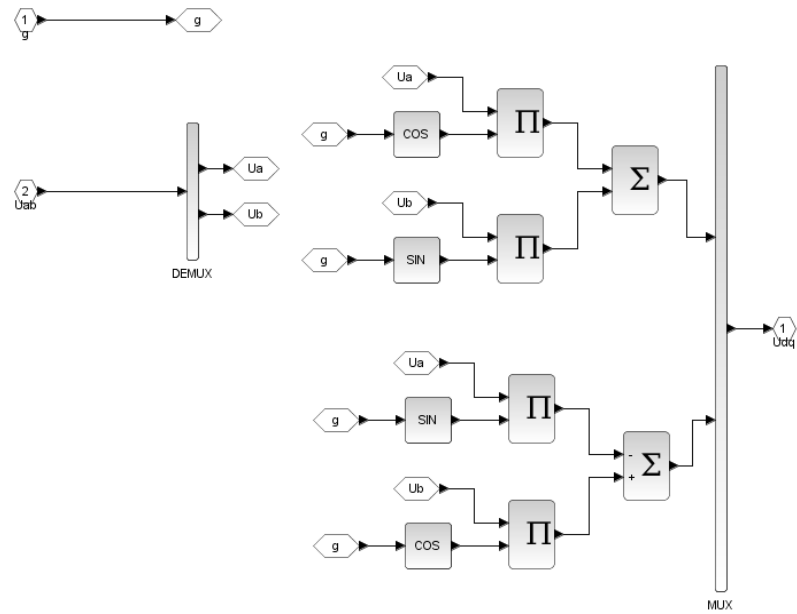


Рисунок 2.15 - Модель преобразователя координат из $\alpha - \beta$ в $d-q$

Из $d-q$ в $\alpha - \beta$

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = I_{sd} \cos \gamma - I_{sq} \sin \gamma \\ I_{s\beta} = -I_{sd} \sin \gamma + I_{sq} \cos \gamma \end{cases} \quad (2.34)$$

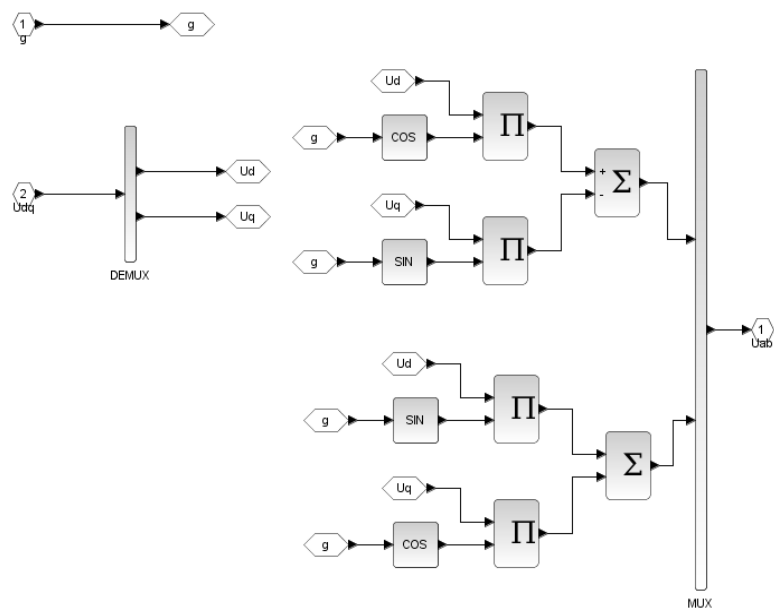


Рисунок 2.16 - Модель преобразователя координат из $d-q$ в $\alpha - \beta$

Задатчики интенсивности и закон управления смоделированы согласно закону $U/f=const$ (рисунки 2.17-2.18).

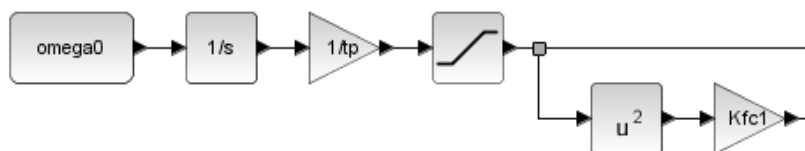


Рисунок 2.17 - Модель задатчика интенсивности по закону $U/f=const$

Для закона $U/f=const$ модель показана на рисунке 2.18.

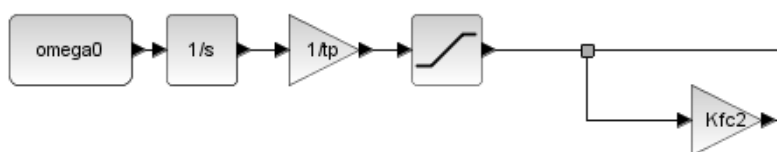


Рисунок 2.18 – Модель задатчика интенсивности по закону $U/f=const$

Расчет параметров модели электропривода насоса типа ГрАТ выполнялся следующим образом (2.35)-(2.50).

Сначала рассчитывается номинальный ток двигателя

$$I_n = \frac{P_{2n}}{\eta_n \sqrt{3} U_n \cos \phi_n} . \quad (2.35)$$

Затем вычисляется коэффициент перевода относительных единиц в физические

$$c = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} . \quad (2.36)$$

Далее рассчитываются параметры схемы замещения в физических единицах

$$X_1 = \frac{2X_1' X_m}{x_m + \sqrt{X_m^2 + 4X_1' X_m}} , \quad (2.37)$$

$$R_1 = R_1' \frac{X_1}{X_1'} . \quad (2.38)$$

Взаимная индуктивность статора и ротора, приведенная к статору, и индуктивность фазы обмотки статора

$$L_m = \frac{X_m c}{n_0} , \quad (2.39)$$

$$L_s = \frac{(X_m + X_1) c}{n_0} . \quad (2.40)$$

Активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора

$$R_s = r_1 = R_1' c , \quad (2.41)$$

$$x_1 = X_1 c . \quad (2.42)$$

Поправочный коэффициент для параметров Г-образной схемы замещения $\sigma_r = \frac{X_1'}{X_1}$.

Активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния ротора, приведенное к статору

$$R_r = r_2' = \frac{R_2'' c}{\sigma_r^2}, \quad (2.43)$$

$$x_2' = \frac{X_2'' c}{\sigma_r^2}. \quad (2.44)$$

Индуктивность фазы обмотки ротора, приведенная к статору

$$L_r = \frac{X_m + \frac{X_2'' c}{\sigma_r^2}}{n_0}. \quad (2.45)$$

Коэффициенты магнитной связи статора и ротора

$$K_S = \frac{L_m}{L_S}, \quad (2.46)$$

$$K_R = \frac{L_m}{L_R}. \quad (2.47)$$

Переходные индуктивности статора и ротора

$$L_S' = (1 - K_S K_R) L_S, \quad (2.48)$$

$$L_R' = (1 - K_S K_R) L_R. \quad (2.49)$$

Далее расчет параметров модели двигателя выполняется по вышеприведенным формулам.

Коэффициент связи расхода и скорости определяется на основе законов подобия

$$\frac{M}{M_n} = \left(\frac{n}{n_n} \right)^2, \quad (2.50)$$

$$M = K_n n^2, \quad (2.51)$$

$$K_n = \frac{M_n}{n_n^2}. \quad (2.52)$$

Коэффициент связи частоты и напряжения при использовании закона управления $U/f \rightarrow \text{const}$

$$K_{fc} = U_n \left(\sqrt{\frac{2}{3}} / n_0^2 \right). \quad (2.53)$$

Модель (рисунок 2.19) в XcosScilab включает в себя задатчик интенсивности, обеспечивающий плавное изменение сигнала задания скорости от 0 до n_0 за время t_n , блок формирования амплитуды напряжения в соответствии с принятым законом управления $U/f \rightarrow \text{const}$, модель идеального преобразователя частоты, модель асинхронного двигателя в системе координат $\alpha - \beta$ и модель нагрузки (вентиляторная характеристика).

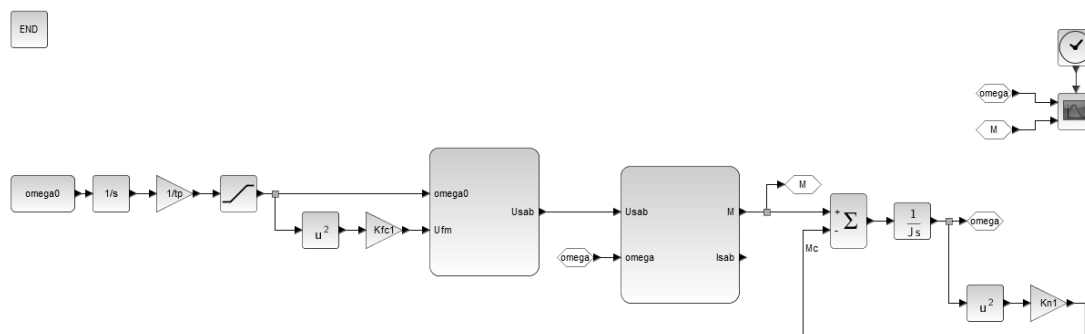


Рисунок 2.19 - Модель электропривода насоса ГрАТ/225/67/3-2,2

Переходные процессы при прямом пуске $t_n=0$ имеют вид, представленный на рисунках 2.20 и 2.21.

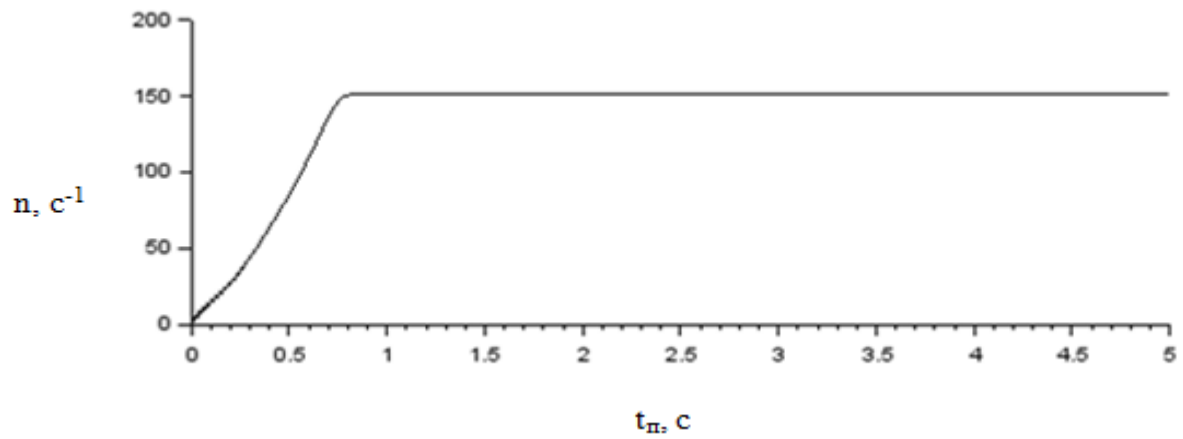


Рисунок 2.20 - Характеристика скорости при прямом пуске $t_n=0$

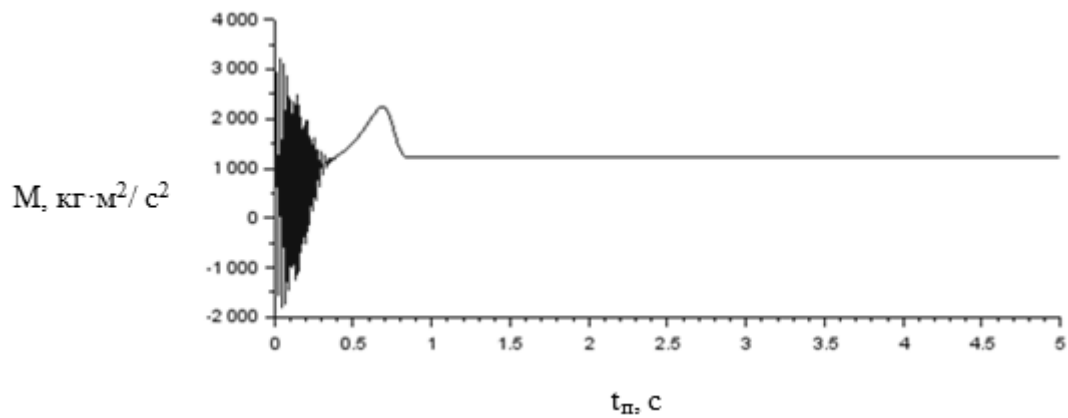


Рисунок 2.21- Характеристика скорости при прямом пуске $t_n=0$

Переходные процессы при частотном пуске $t_n=2,5$ имеют вид, представленный на рисунках 2.22 и 2.23.

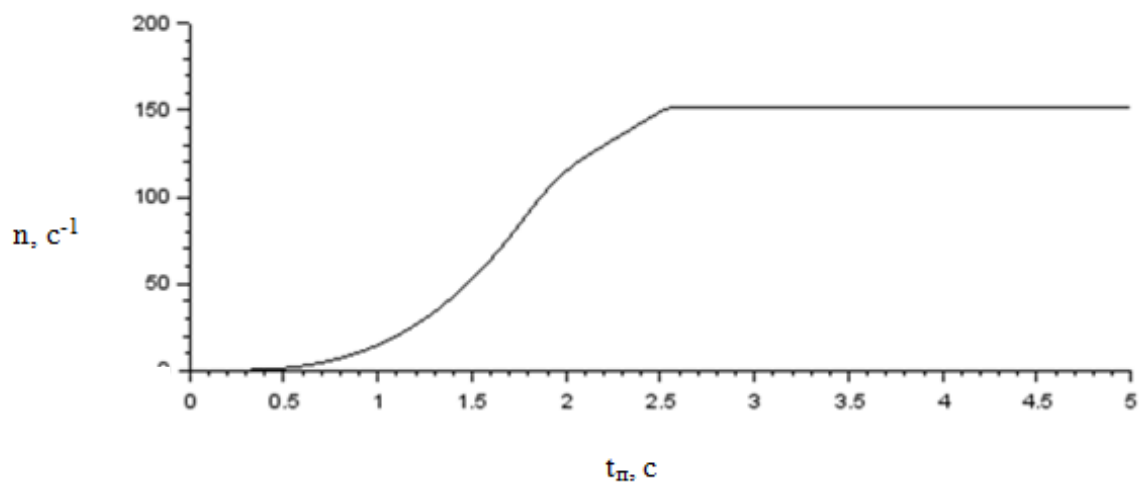


Рисунок 2.22 - Характеристика скорости при частотном пуске $t_n=2,5$

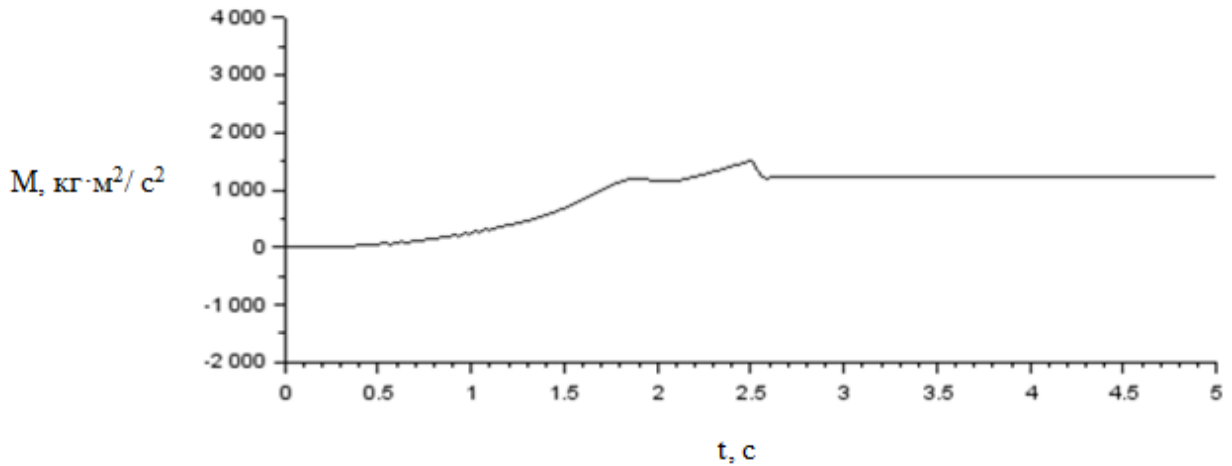


Рисунок 2.23 - Характеристика момента при частотном пуске $t_n=2,5$

В результате имитационного моделирования с подробным пояснением блоков, входящих в электропривод, который будет регулировать насос, можно сделать вывод, что частотное регулирование является эффективным, однако имеются его пределы.

На рисунке 2.24 приведена блок-схема, в которой учтены параметры, по которым будет регулироваться насосный агрегат с введенными байпасными линиями по воде и твердому веществу.

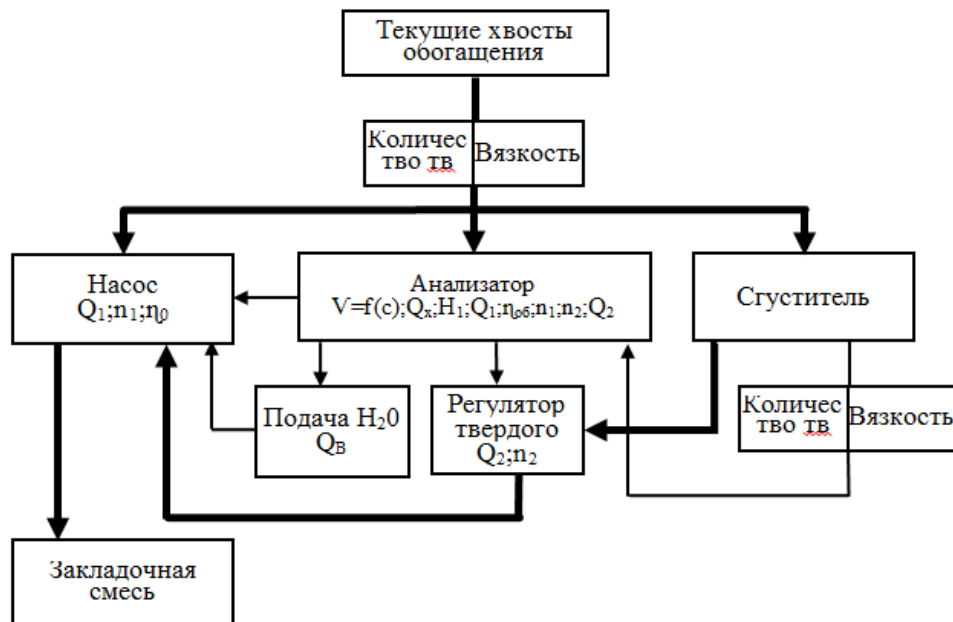


Рисунок 2.24 - Алгоритм управления грунтовым насосом в системе закладочного комплекса

Алгоритм управления грунтовым насосом включает в себя следующие блоки, в которых содержится информация о: текущих хвостах обогащения, количестве твердого вещества и вязкости, сгустителе, насосе, анализаторе, подаче пульпы, регуляторе твердого вещества, закладочной смеси.

На вход поступает информация о состоянии приходящих к закладочному комплексу текущих хвостах обогащения. Далее анализируется информация о содержании твердой фазы в поступившей жидкости и, соответственно, ее вязкости. Если все параметры удовлетворяют требуемым для номинального режима работы насоса либо с отклонением рабочей точки в диапазоне не более 5-10 %, то далее пульпа поступает к закладочному комплексу для добавления вяжущего компонента и приготовления закладочной смеси. Если количество твердого вещества не удовлетворяет требованиям, то есть поступившая смесь слишком жидкая или слишком густая, то анализатор, определяет, как необходимо отрегулировать насос до допустимого диапазона режима работы. В зависимости от этой информации, используется либо частотное регулирование, либо комбинированный способ, в котором кроме изменения скорости вращения вала насоса с помощью электропривода, идет подключение байпасных линий по воде и твердой фазе. При поступлении низкоконцентрированной смеси с содержанием до 10 % твердой фазы, и насос не может поддержать рабочую точку насоса в допустимых значениях, то следует добавить твердого вещества. Аналогично со случаем, если поступила на вход высококонцентрированная смесь. Если концентрация превышает 70 % по твердой фазе, и насос не справляется, то следует добавить воды.

Данный алгоритм был проверен в условиях предприятия АО ВО «Электроаппарат». Была собрана насосная установка, имитирующая работу насосного агрегата для перекачки пульпы.

В насосную установку входили следующие элементы:

1. Электродвигатель АИР 71 В8 с частотой вращения $n=750$ об/мин;
2. Редуктор Ч-125;

3. Вакуумный насос Dilo B078R06;
4. Нагрузка, имитирующая перекачиваемую среду (SF_6);
5. Датчики контроля элегаза (SF_6) СИГМА-03;
6. Цифровой энкодер;
7. Аналого-цифровой преобразователь.

На основании данных компонентов была собрана насосная установка с шунтирующим отводом, имитирующая гидротранспортный комплекс с байпасной линией. Главная цель испытаний собранной установки - подтвердить предположение, что при различных концентрациях перекачиваемой среды эффективно применять частотное регулирование. При малых значениях концентрации среды необходимо добавлять перекачиваемую среду, сохраняя положение рабочей точки насоса в допустимых пределах, а при избытке, направлять излишнее количество по байпасной линии. Испытания показали:

- Насосная установка позволяет поддерживать коэффициент полезного действия постоянным, ход рабочей точки в пределах 5-10 %;
- Предположение для имитирующей работу насосного агрегата установки подтвердило целесообразность применения данного способа регулирования.

Полученные результаты испытаний показали целесообразность применения частотного способа регулирования насосного агрегата с включением байпасной линии. Рекомендуется провести испытания установки, включающей грунтовый насос и перекачиваемую гидросмесь, т.е. соответствующие условиям реальной эксплуатации.

2.4 Оценка уровня надежности системы транспортирования гидросмеси

В системах гидравлического транспорта, применяемых в горной промышленности, наблюдаются частые отказы технологического оборудования [5, 11, 30, 33, 40, 48, 57, 67, 91, 96].

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 как общее резервирование, так и раздельное. При общем резервировании отказ любого элемента приводит к отказу всей системы; при раздельном резервировании отказ какого-либо элемента приводит только к отказу соответствующего участка гидротранспортной системы. Как известно из теории надежности, второй способ резервирования обеспечивает более высокую надежность всей системы или установки при условии, что переключающие элементы (в данном случае задвижки) 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 отказало более m элементов, то возникнет 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 равно $\lambda = 1/T_{cp}$ 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_{n_2+1} – отражающее) будет иметь вид (2.54)

$$H_0 \xrightleftharpoons[\mu]{n_1\lambda} H_1 \xrightleftharpoons[2\mu]{n_1\lambda} H_2 \xrightleftharpoons[m\mu]{n_1\lambda} \dots H_{n_2} \xrightleftharpoons[m\mu]{n_1\lambda} H_{n_2+1}, \quad (2.54)$$

где μ – интенсивность восстановления.

Если принять, что состояние H_{n_2+1} – поглощающее, то фрагмент графа, включающий состояния H_{n_2+n} и H_{n_2+1} будет иметь вид (2.55)

$$H_0 \xrightleftharpoons[\mu]{n_1\lambda} H_1 \xrightleftharpoons[2\mu]{n_1\lambda} H_2 \xrightleftharpoons[m\mu]{n_1\lambda} \dots H_{n_2} \xrightleftharpoons[m\mu]{n_1\lambda} H_{n_2+1} \xrightleftharpoons[m\mu]{2\lambda} H_{n_2+1} \xrightarrow{\lambda} H_N. \quad (2.55)$$

Остальные части графа не будут отличаться от состояния (2.54).

Для графа переходов (2.54) можно написать систему линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} P_0'(t) = n_1\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ P_1'(t) = n_1\lambda P_0(t) - (n_1\lambda + \mu)P_1(t) + 2\mu P_2(t), \\ P_2'(t) = n_1\lambda P_0(t) - (n_1\lambda + 2\mu)P_2(t) + 3\mu P_3(t), \\ \dots \\ P_{n_2}'(t) = n_1\lambda P_{n_2-1}(t) - (n_1\lambda + m\mu)P_{n_2}(t) + m\mu P_{n_2+1}(t), \\ P_{n_2+1}'(t) = n_1\lambda P_{n_2}(t) - m\mu P_{n_2+1}(t). \end{cases}$$

Если состояние H_{n_2+1} – поглощающее, то система дифференциальных уравнений будет отличаться от предыдущей только двумя последними уравнениями, которые имеют вид

$$\begin{cases} P_{n_2}'(t) = n_2\lambda P_{n_2-1}(t) - (n_1\lambda + m\mu)P_{n_2}(t), \\ P_{n_2+1}'(t) = n_1\lambda P_{n_2}(t). \end{cases}$$

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. При состоянии H_{n_2+1} - отражающем

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

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

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

Решение приведенных уравнений (система алгебраических уравнений) будет следующим:

$$P_i = \frac{\theta_i}{\sum_{K=0}^N \theta_K},$$

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 коэффициента полезного действия 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.

2.5 Выводы по второй главе

1. Рассмотрены и смоделированы режимы работы насоса ГрАТ- 225/67/3/2,2 при различных концентрациях.

2. Собрана имитационная модель насосного агрегата с преобразователем частоты с целью выяснить, насколько целесообразно использовать частотное регулирование для системы закладочного комплекса с грунтовым насосом. Данный способ подтвердил регулирование, но для повышения эффективности было предложено ввести байпасные линии.

3. Приведен алгоритм управления грунтовым насосом в системе закладочного комплекса.

4. Обозначен вопрос надежности работы оборудования и определены наиболее важные параметры, при учете которых можно получить наиболее полные сведения о безотказности работы систем.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ГИДРОСМЕСЕЙ С ПЕРЕМЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ К ЗАКЛАДОЧНОМУ КОМПЛЕКСУ

3.1 Влияние объёмной концентрации гидросмеси на работу системы насос-пульпопровод

Одним из важных факторов, влияющих на эффективность работы центробежных пульпонасосов, является объемная концентрация пульпы, которая определяется как (3.1)

$$c_v = \frac{v_{тв}}{v_ж} = \frac{\rho_n - \rho_ж}{\rho_{см} - \rho_ж}, \quad (3.1)$$

где $v_{тв}$ - объём твёрдой фазы, м³;

$v_ж$ - объём жидкой фазы, м³;

ρ_n - плотность твёрдой фазы, кг/м³;

$\rho_ж$ - плотность жидкой фазы, кг/м³;

$\rho_{см}$ - плотность гидросмеси, кг/м³.

Рассмотрим влияние этого фактора на совместную работу грунтового насоса и трубопровода.

В первом приближении гидравлическая характеристика насоса при работе с номинальной концентрацией пульпы может быть описана выражением (3.2)

$$H_n = H_{n0} - k_n Q^2, \quad (3.2)$$

где H_{n0} - напор при нулевом расходе, м;

k_n - коэффициент напора;

Q - расход, м³/ч.

Характеристика трубопровода, соответственно имеет вид (3.3)

$$H_n = H_{c0} - k_c Q^2. \quad (3.3)$$

Положение точки пересечения этих характеристик, которая соответствует установившемуся режиму работы, может быть найдена из условия равенства расходов по формуле (3.4)

$$Q_a = \sqrt{\frac{H_{n0} - H_{c0}}{k_n + k_c}}. \quad (3.4)$$

Установившийся напор (3.5) может быть найден подстановкой (3.4) в (3.3)

$$H_a = H_{c0} + k_c Q_a^2. \quad (3.5)$$

Для того, чтобы проверить вышесказанные рассуждения, условно примем в относительных единицах $k_c = 0,15$, $H_{n0} = 1$, $k_n = 0,35$, $H_c = 0,25$, $c_v = 1$. Получаем графики зависимости напора от расхода (рисунок 3.1) в ходе имитационного моделирования в программе Scilab.

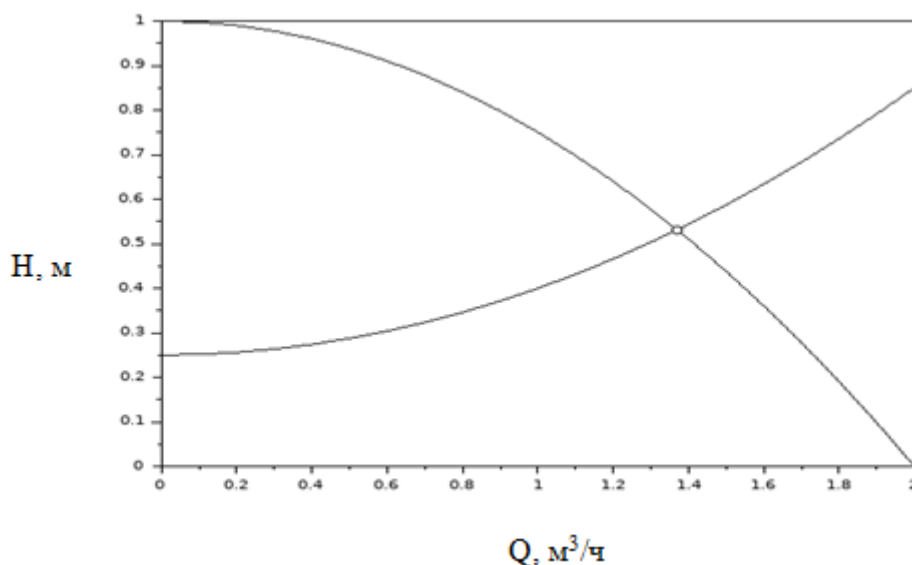


Рисунок 3.1 - Зависимость расхода от напора от расхода при имитационном моделировании

При изменении объемной концентрации пульпы, её плотность изменяется пропорционально, что выражается (3.6)

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{c_{v1}}{c_{v2}}. \quad (3.6)$$

Зная, что давление, напор, плотность связаны выражением (3.7)

$$P = \rho g H, \quad (3.7)$$

предположим, что создаваемое насосом давление от плотности и концентрации не зависит (3.8)

$$P_1 = P_2, \quad (3.8)$$

и получаем на основе этого выражение (3.9)

$$\rho_1 g H_1 = \rho_2 g H_2. \quad (3.9)$$

Выразим (3.6) в виде (3.10)

$$c_{v1} H_1 = c_{v2} H_2. \quad (3.10)$$

Получим (3.11)

$$H_2 = \frac{c_{v1}}{c_{v2}} H_1. \quad (3.11)$$

В результате получим формулу (3.12)

$$H'_{n0} = \frac{H_{n0}}{c'_v / c_v}, \quad (3.12)$$

в которой величины со штрихом соответствуют отклонению величин от номинальных при изменении концентрации.

Коэффициент k_n в формуле (3.2) зависит главным образом от вязкости перекачиваемой жидкости, в частности известны методики пересчета аналогичных характеристик для нефтеперекачивающих насосов при перекачке нефти различной вязкости. Однако учитывая пологий характер характеристик пульпонасосов, в первом приближении примем что (3.13)

$$k'_n = k_n. \quad (3.13)$$

Вероятно, что более точно определить зависимость $k'_n = f\left(\frac{c'_v}{c_v}\right)$ можно экспериментальным путем для конкретных видов гидросмеси.

Что касается характеристик трубопровода, то известны достаточно сложные методы пересчета данных характеристик, но анализируя характер экспериментальных кривых приведенных в работах В.И. Александрова, можно упрощенно предположить следующий характер зависимостей (3.14)-(3.15) коэффициентов в формуле (3.3) от концентрации

$$H'_{c0} = H_{c0} \left(\frac{c'_v}{c_v} \right), \quad (3.14)$$

$$k'_n = k_n \left(\frac{c'_v}{c_v} \right). \quad (3.15)$$

На основании этого можно предположить, что с ростом концентрации статическая и динамическая составляющие потерь напора пропорционально увеличиваются.

С учётом формул (3.12) – (3.15) и выражений (3.1) – (3.3) при условии принятых выше ограничений, был выполнен расчет искусственных характеристик на ЭВМ при изменении концентрации c' в диапазоне от 0,8 до 1,2 с шагом 0,1. В результате были получены графики, представленные на рисунке 3.2.

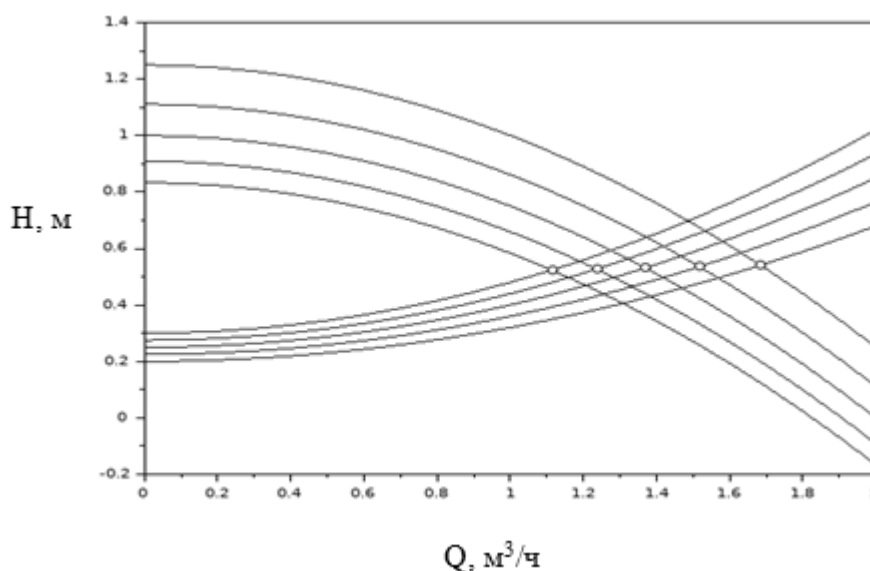


Рисунок 3.2 - Зависимость напора от расхода при изменении концентрации гидросмеси

Из полученных графиков наблюдается, что положение рабочих точек при изменении объемной концентрации пульпы практически не зависит от объемного расхода пульпы. Таким образом, можно сделать вывод, что установившееся значение напора в системе пульпонасос-пульпопровод от объемной концентрации пульпы не зависит. Изменение начальных значений коэффициентов k_c , H_{n0} , k_n , H_c , c_v на характер поведения рабочих точек

существенно не влияет. Следует отметить, что несмотря на то, что данный факт был установлен путем численных расчетов, возможно обоснование данного факта теоретически.

3.2 Моделирование режимов работы установки транспортирования хвостов обогащения железной руды

Многие горные и транспортные машины работают в условиях резко переменных нагрузок, при ограничении мощности первичного источника энергии (дизель-генератор большегрузного самосвала, аккумулятор или питающая сеть для рудничного электровоза). В таких условиях рациональным является реализации в электроприводе режима стабилизации мощности, при котором скорость вращения вала приводного электродвигателя снижается по мере увеличения нагрузки на него. Такой же режим работы было бы целесообразно использовать в системах регулируемого электропривода шламовых насосов, применяемых в системах гидротранспорта на горно-обогатительных предприятиях. При изменении концентрации перекачиваемой пульпы нагрузка на привод увеличивается пропорционально увеличению массового расхода, что приводит к повышенному износу электромеханического оборудования насосных станций и к снижению эффективности работы гидротранспортной системы.

Важно повышать энергоёмкость систем для снижения затрат производства.

Удельная энергоёмкость (3.16) рассчитывается по формуле:

$$e = \frac{N}{q_{тв} L} = \frac{\rho_{см} g I_{см}}{3.6 \rho_{тв} c_{об}}, \quad (3.16)$$

где e - удельная энергоёмкость процесса, кВт·ч/т·км;

N - мощность насосов, кВт;

$q_{тв}$ - производительность системы по твердому материалу, т·ч;

L - длина трубопровода расстояние транспортирования, км;

$\rho_{см}$ - плотность гидросмеси, т/м³;

$\rho_{тв}$ - плотность твердых хвостов, т/м³;

g - ускорение силы тяжести, м/с²;

$I_{см}$ - удельные потери напора, м вод. ст./м;

$c_{об}$ - объемная концентрация твердых частиц.

Из формулы видно, что при увеличении концентрации пульпы выше номинального значения энергоемкость гидротранспорта значительно увеличивается. При этом механическая мощность на валу двигателя превышает номинальное значение. Это приводит к повышенному нагреву двигателя и к снижению его ресурса. Так как обеспечить стабильность концентрации пульпы не всегда возможно, то предлагается ограничить потребляемую двигателем мощность путем использования частотно-регулируемого электропривода. Его алгоритм позволит сформировать искусственную механическую характеристику близкую к кривой постоянной мощности. В этом случае при возрастании нагрузки, задание скорости будет автоматически снижаться, ограничивая нагрузку на приводной двигатель.

При стабилизации мощности эта проблема частично решается, так как при изменении концентрации пульпы одновременно с этим происходит и изменение нагрузки привода, что приведет к автоматическому изменению скорости привода и, соответственно, к изменению массового расхода.

Следует отметить, что режим стабилизации мощности не может быть обеспечен во всем диапазоне нагрузок. Так при малых нагрузках скорость вращения вала двигателя может превысить допустимую для механической конструкции двигателя и механизма, в частности, для их подшипниковых узлов. Максимальный момент электропривода также должен быть ограничен из соображения ограничения допустимого тока привода и механических усилий. В этой связи искусственная механическая характеристика должна иметь вид, представленный на рисунке 3.3.

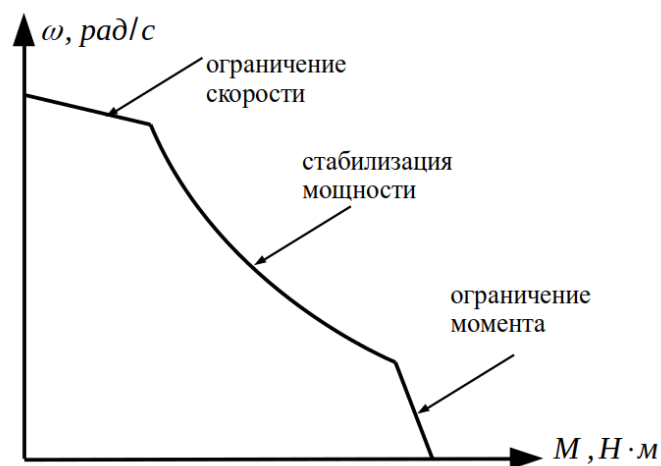


Рисунок 3.3 - Искусственная механическая характеристика электропривода со стабилизацией мощности

Традиционно в системах электропривода при необходимости получения кривой, близкой к кривой постоянной мощности, использовались электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением (сериесные двигатели) или универсальные коллекторные машины. В таких двигателях обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря, что автоматически обеспечивает снижение потока возбуждения при снижении нагрузки электродвигателя и, соответственно, увеличение его при возрастании нагрузки. При этом механическая характеристика автоматически получается подобна кривой постоянной мощности.

Электроприводы переменного тока обладают существенными преимуществами в сравнении с электроприводами постоянного тока, в частности, лучшими масс-габаритными показателями, простотой конструкции, надежностью, меньшими затратами на обслуживания. Однако они, как правило, имеют жесткую естественную механическую характеристику, весьма далекую от кривой постоянной мощности, в связи с этим разработка систем управления, обеспечивающих формирование искусственной механической характеристики, аналогичной приведенной на рисунке 3.3 является актуальной задачей. Нужно обеспечить формирование такой характеристики в регулируемом электроприводе на основе асинхронного электродвигателя с векторной системой управления.

При векторном регулировании скорости асинхронного электродвигателя в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора, электромагнитный момент (3.17) равен

$$M = \frac{3}{2} p K_r \psi_r i_{sq}, \quad (3.17)$$

где p - число пар полюсов;

$K_r = \frac{L_m}{L_r}$ - постоянный коэффициент, равный отношению индуктивности намагничивания к индуктивности рассеяния ротора;

ψ_r - потокосцепление ротора, Вб;

i_{sq} - моментобразующая составляющая тока статора двигателя, А.

Потокасцепление связано с параметрами двигателя следующим уравнением в операторной форме (3.18)

$$\Psi_{rd} = \frac{T_r}{1 + T_r s} K_r R_r i_{sd}, \quad (3.18)$$

где $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ - постоянная времени роторной цепи;

R_r - приведенное сопротивление обмотки ротора, Ом;

i_{sd} - потокообразующая составляющая тока статора, А;

s - оператор Лапласа.

В векторной системе управления выделяется два канала регулирования. Один канал стабилизирует потокасцепление ротора путем стабилизации потокообразующей составляющей тока статора i_{sd} в соответствии с выражением (3.18). Второй канал обеспечивает регулирование скорости путём воздействия на моментобразующую составляющую тока статора i_{sq} .

Подобные системы управления и их моделирование в программе Xcos Scilab были в работе [102].

В целях получения искусственной механической характеристики близкой к кривой постоянной мощности предлагается регулировать задание контура регулирования потокообразующей составляющей тока статора

пропорционально моментобразующей составляющей тока статора. В результате этого потокосцепление будет изменяться пропорционально нагрузке привода, аналогично тому, как это происходит в электроприводе постоянного тока на основе двигателя с последовательным возбуждением.

Кроме изменения задания контура регулирования потокосцепления необходимо предусмотреть нелинейные задержанные обратные связи по скорости вращения и по моментобразующей составляющей тока статора. Эти обратные связи обеспечат коррекцию задания регулятора скорости в целях ограничения скорости и нагрузки соответственно. Работу этих обратных связей можно описать следующим образом (3.19)-(3.20)

- если $x \leq x_c$, то

$$y = 0, \quad (3.19)$$

- если $x > x_c$, то

$$y = k_{oc}x, \quad (3.20)$$

где x - входной сигнал от датчика ограничиваемой величины;

x_c - значение x при котором задержанная обратная связь включается;

y - выходной сигнал обратной связи;

k_{oc} - настраиваемый коэффициент обратной связи.

На основе вышеизложенного была разработана компьютерная модель системы регулируемого векторного асинхронного электропривода, обеспечивающая формирование кривой, близкой к кривой постоянной мощности, представленная на рисунке 3.4. Модель имеет блок формирования задания потокосцепления в функции моментобразующей составляющей тока статора и блоки ограничения скорости и момента. Коэффициенты настройки данных блоков определялись подбором при экспериментах с компьютерной моделью.

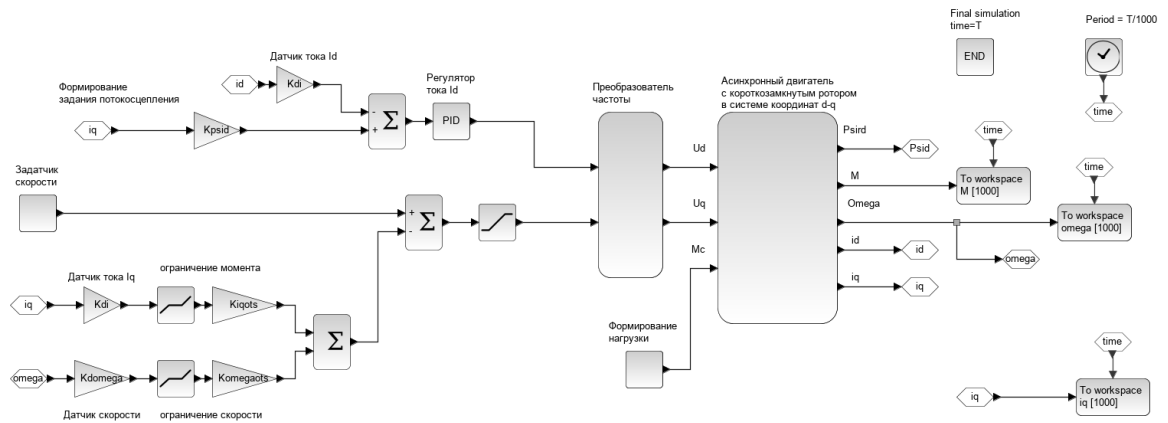


Рисунок 3.4 - Компьютерная модель системы стабилизации мощности электропривода в Xcos Scilab

Было выполнено моделирование пуска привода при моменте сопротивления равном четверти от номинального момента двигателя $M_c = 0,25M_H$, а затем скачкообразное изменение момента сопротивления движению до величины $M_c = 4M_H$. Графики переходных процессов приведены на рисунках 3.5 и 3.6. Прямыми показаны номинальные значения тока и момента электропривода.

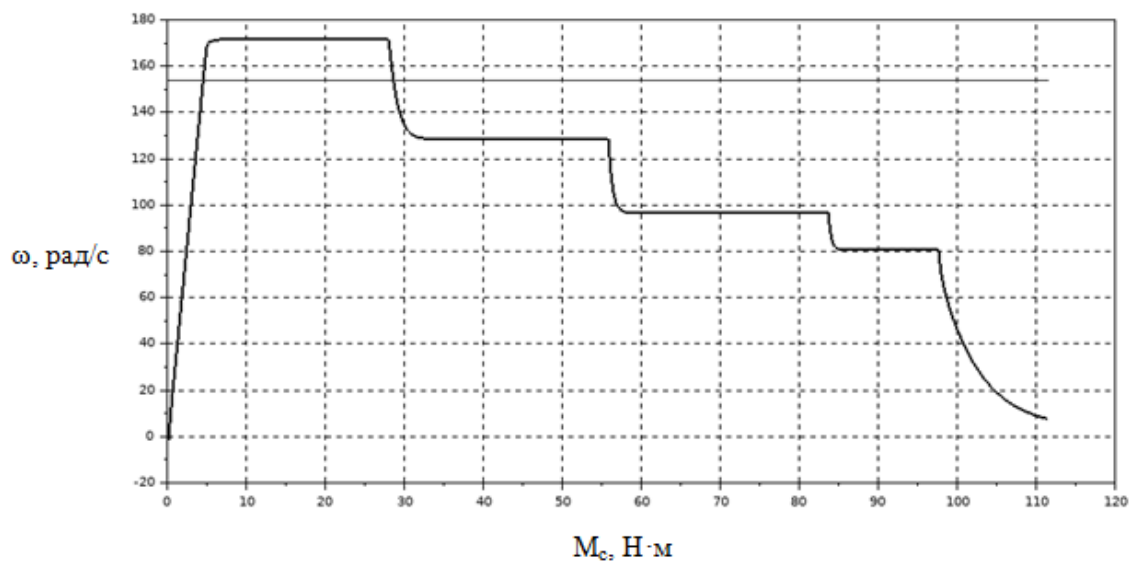


Рисунок 3.5 - Зависимость скорости от увеличения нагрузки

По данным экспериментов была построена искусственная механическая характеристика привода, приведенная на рисунке 3.7. Из графика видно, что характеристика аналогична приведенной на рисунке 3.3, что говорит о работоспособности предлагаемой структуры системы управления.

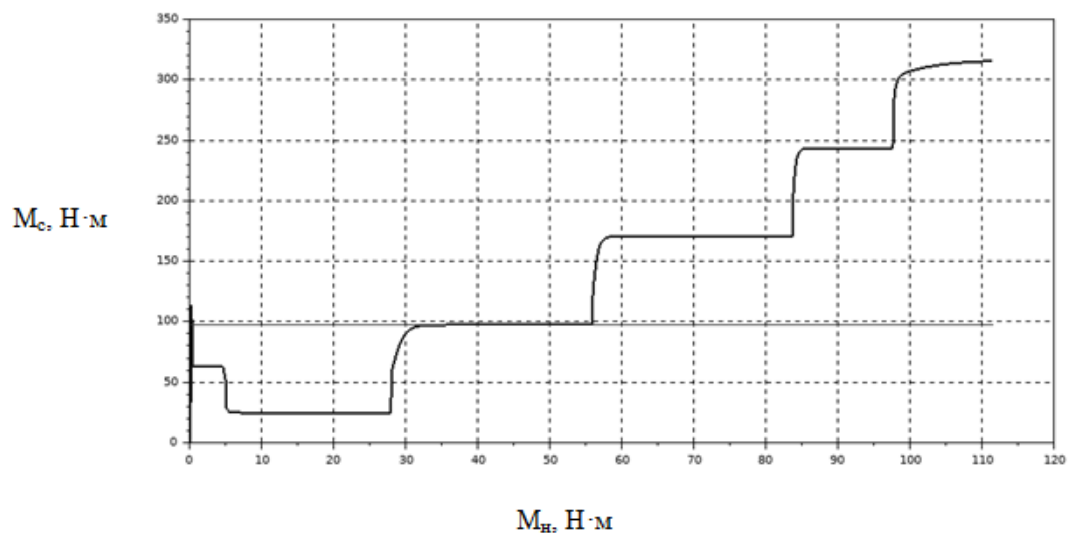


Рисунок 3.6 - Зависимость момента от увеличения нагрузки

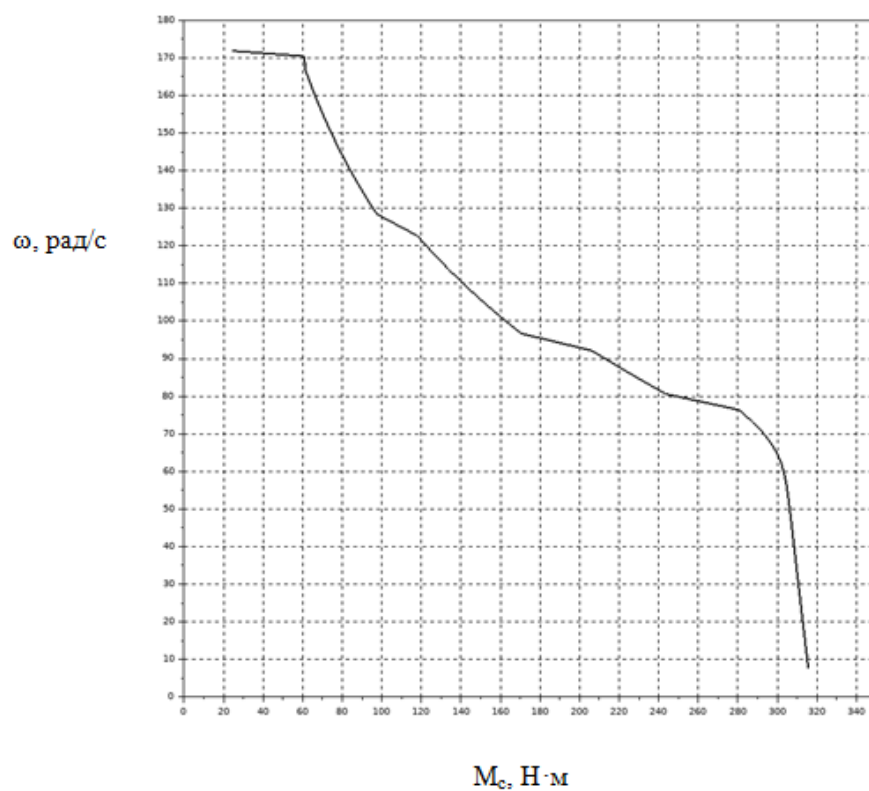


Рисунок 3.7 - Искусственная механическая характеристика электропривода

В результате моделирования была показана возможность формирования искусственной механической характеристики регулируемого электропривода переменного тока близкой к кривой постоянной мощности путем изменения задания для контура регулирования потокообразующей составляющей тока статора в функции его моментобразующей

составляющей. Требуемые ограничения скорости и момента привода достигаются введением дополнительных нелинейных задержанных обратных связей по моментообразующей составляющей тока статора и скорости ротора, корректирующих задание скорости вращения привода. Компьютерное моделирование показало работоспособность такой системы управления.

3.3 Лабораторный стенд для исследований режимов работы грунтового насоса при разной концентрации

Имитационные модели должны подтверждаться на практике. На рисунке 3.8 представлен лабораторный стенд, разработанный кафедрой. С его помощью планируется изучить практическую работоспособность при использовании частотного регулирования при концентрации твёрдой фазы пульпы от 10 до 70 %.

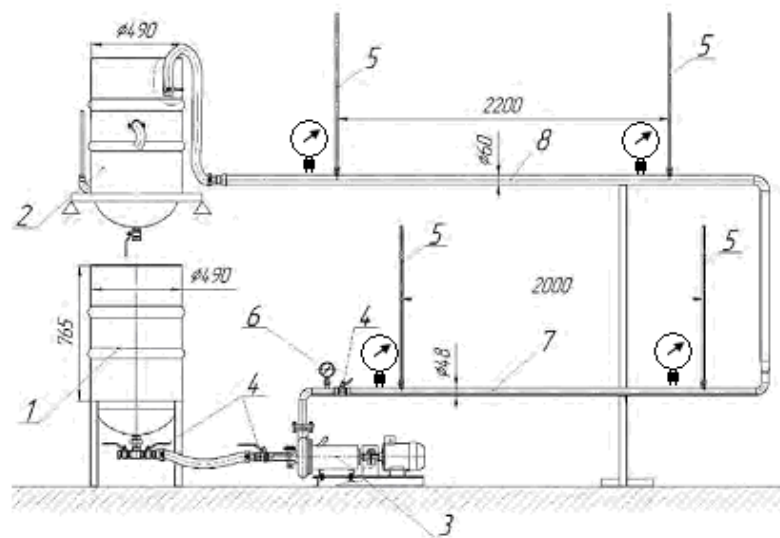


Рисунок 3.8 - Схема лабораторного стенда гидротранспортной установки

В схему лабораторной гидротранспортной установки входят: зумпф объемом 200 л 1, измерительный бак 2, насос 4НФ-У2 3, шаровый кран 4, пьезометр 5, образцовые манометры 6, трубопровод 7 с внутренним диаметром 40 мм, трубопровод с внутренним диаметром 50 мм 8.

В данной установке проводились исследования по перекачиванию пульпы при различных концентрациях. В установке имеются части

трубопровода с различным диаметром с установленными на них манометрами для того, чтобы знать, каковы перепады давления, тем самым определяя, какая нагрузка действует на насос.

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 (3.21), функция имеет вид

$$\tau = f(\dot{\gamma}), \quad (3.21)$$

где τ - напряжение сдвига, $\frac{H}{M^2}$;

$\dot{\gamma}$ - градиент скорости, c^{-1} .

Для ротационного вискозиметра - одного из необходимых датчиков, - величину касательного напряжения, проявляющегося в виде сопротивлений при вращении внутреннего цилиндра за счет действия груза, можно определить по формуле (3.22)

$$\tau = K_0 \cdot \Delta P = 1,06 \cdot \Delta P, \quad (3.22)$$

где K_0 - константа прибора;

ΔP - масса груза, г.

Градиент скорости вычисляется как средний по ширине рабочего зазора между цилиндрами ротационного вискозиметра (3.23)

$$\dot{\gamma} = \frac{2\pi \cdot R_{вн} \cdot n}{R_n - R_{вн}}, \quad (3.23)$$

где n - число оборотов внутреннего цилиндра, равно $\frac{9}{t}$, c^{-1} ;

$R_{вн}$ - радиус внутреннего цилиндра, равен 0,18 м;

R_n - радиус наружного цилиндра, равен 0,225 м;

t - время, с.

Основываясь на известных данных, получим градиент скорости (3.24)

$$\dot{\gamma} = 25,13n. \quad (3.24)$$

Опытные и расчетные данные по результатам экспериментов на вискозиметре приведены в таблицах 3.1 и 3.2 и показаны на рисунках 3.9 и 3.10 соответственно.

Таблица 3.1 – Опытные данные экспериментальных исследований медных хвостов обогащения

Концентрация, c_p , %	Масса груза, ΔP , г	Число оборотов, n , c^{-1}	Напряжение сдвига, τ , $\frac{H}{m^2}$	Градиент скорости, $\dot{\gamma}$, c^{-1}
42,80	3	1,66	3,18	41,70
	4	1,97	4,24	49,49
	5	2,29	5,30	57,52
	6	2,43	6,36	61,04
	7	2,67	8,42	67,07
	9	3,30	9,54	82,90
	11	4,04	11,66	101,48
	13	4,29	13,78	107,76
59,83	2	1,03	2,12	25,87
	3	1,29	3,18	32,40
	4	1,55	4,24	38,94
	5	1,79	5,30	44,96
	7	2,37	7,42	59,53
	8	2,57	8,48	64,56
	9	2,73	9,54	68,58
	10	3,03	10,60	76,11
	11	3,33	11,66	83,65
	13	3,70	13,78	92,94
	15	4,29	15,90	107,76
62,23	3	0,88	3,18	22,00
	4	1,06	4,24	26,60
	5	1,14	5,30	28,61
	6	1,58	6,36	39,66
	7	1,78	7,42	44,59
	8	2,05	8,48	51,37
	9	2,33	9,54	58,43
	10	2,59	10,60	65,06
	12	3,10	12,72	77,87
	13	3,36	13,78	84,68
65,70	7	0,98	7,42	24,62
	8	1,18	8,48	29,64
	9	1,44	9,54	36,17
	10	1,66	10,60	41,70

Продолжение таблицы 3.1

	11	1,91	11,66	47,98
	12	2,16	12,72	54,26
	13	2,43	13,78	61,04
	15	2,79	15,90	70,08
	17	3,10	18,02	77,87
	19	3,60	20,14	90,43
	21	4,04	22,26	101,48
	23	4,43	24,38	111,28
71,00	10	0,19	10,60	4,69
	11	0,33	11,66	8,37
	12	0,49	12,78	12,24
	13	0,65	13,78	16,38
	14	0,87	14,84	21,95
	15	1,06	15,90	26,60
	17	1,53	18,07	38,32
	18	1,70	19,08	42,66
	29	2,09	20,12	52,58
	22	2,62	23,32	65,91
	24	3,00	25,44	75,36
	26	3,42	27,56	85,96
	28	3,60	29,68	90,43
	30	4,29	31,80	107,70
76,00	63	0,20	66,78	5,02
	65	0,28	68,90	6,91
	67	0,40	71,02	10,12
	69	0,59	73,14	14,78
	71	0,74	75,26	18,58
	73	0,90	77,38	22,62
	75	1,08	79,50	27,24
	77	1,20	81,62	30,14
	80	1,43	84,80	35,89
	82	1,61	86,92	46,37
	85	1,86	90,10	46,61
	90	2,31	95,40	57,97
	95	2,73	100,70	68,51

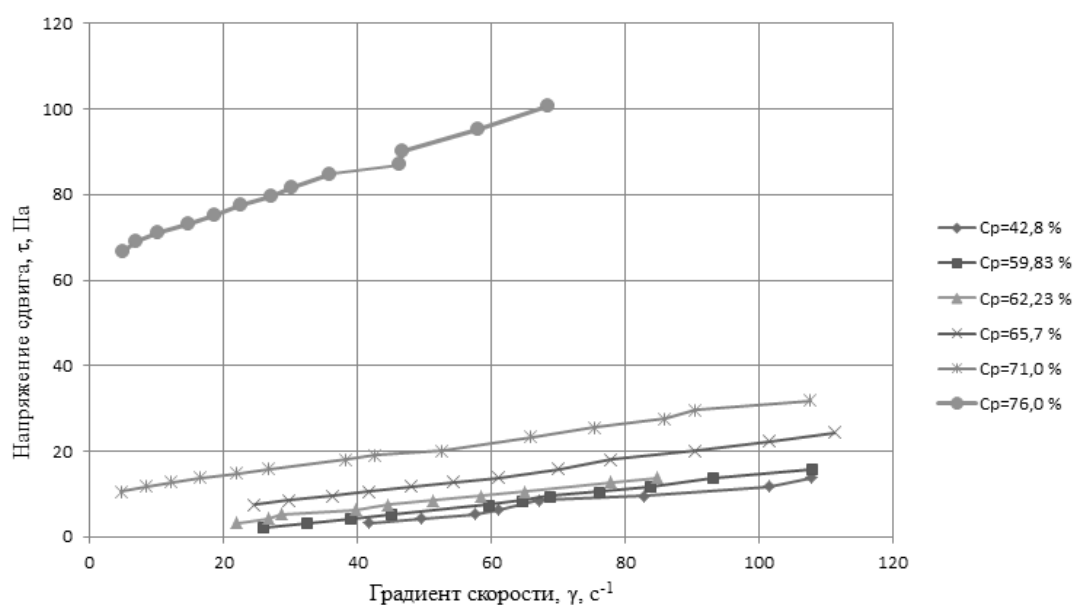


Рисунок 3.9 - Изменение функции градиента скорости при различных концентрациях хвостов обогащения медной руды

Таблица 3.2 – Опытные данные экспериментальных исследований медно-свинцовых хвостов обогащения

Концентрация, c_p , %	Масса груза, ΔP , г	Число оборотов, n , c^{-1}	Напряжение сдвига, τ , $\frac{H}{m^2}$	Градиент скорости, $\dot{\gamma}$, c^{-1}
40,5	2	0,63	2,12	15,92
	3	0,91	3,18	22,84
	4	1,08	4,24	27,24
	5	1,29	5,3	32,30
	6	1,58	6,36	39,66
	8	2,09	8,48	52,57
	9	2,37	9,54	59,50
	10	2,57	10,6	65,59
	11	2,73	11,66	68,51
	12	3,00	12,72	72,36
	13	3,33	13,78	83,73
	14	3,60	14,84	90,43
	15	3,91	17,42	98,30
56,2	2	0,44	2,12	10,92
	3	0,68	3,18	17,13
	4	0,90	4,24	22,61
	5	1,17	5,3	29,36
	6	1,48	6,36	37,06
	8	1,77	7,42	44,33

Продолжение таблицы 3.2

	9	2,09	8,32	52,58
	10	2,37	9,54	59,49
	11	2,43	10,6	61,10
	12	2,73	11,66	68,51
	13	2,90	12,72	72,93
	14	3,33	13,78	83,73
	15	3,91	15,90	98,30
73,2	23	0,28	24,38	7,13
	24	0,38	25,94	9,49
	25	0,53	26,5	13,30
	26	0,61	27,56	15,28
	27	0,75	28,62	18,84
	28	0,95	29,68	23,80
	29	1,09	30,74	27,57
	30	1,17	31,8	29,36
	31	1,43	32,86	35,89
	32	1,53	33,92	38,32
	33	1,69	34,98	42,66
	35	2,00	37,1	50,24
	37	2,19	39,22	55,14
	39	2,57	41,34	64,59
	41	3,10	43,46	77,96

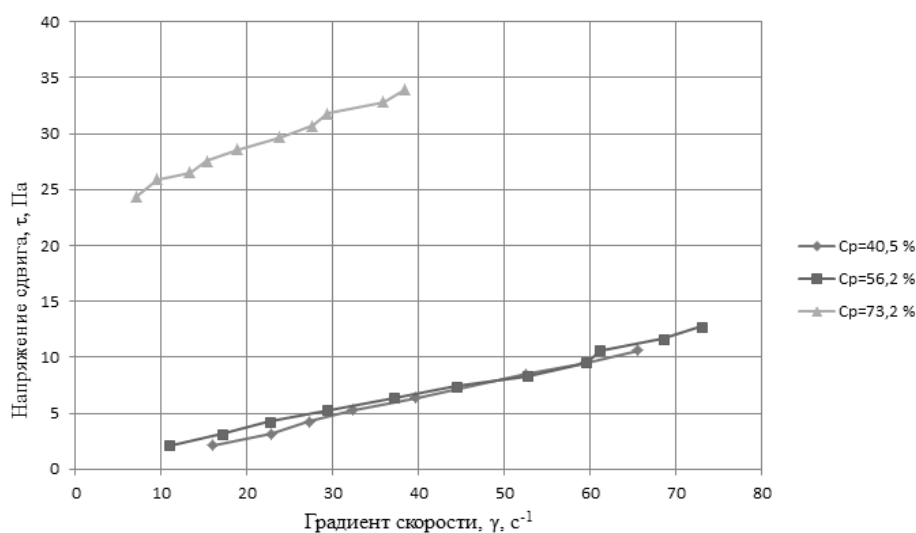


Рисунок 3.10 - Изменение функции градиента скорости при различных концентрациях хвостов обогащения медно-свинцовой руды

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 $\tau = f(\gamma)$ к оси абсцисс. Зависимость коэффициента вязкости от концентрации твердой фазы в объеме гидросмеси хвостов обогащения медной и медно-свинцовой руды представлена на рисунке 3.1. 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.

3.4 Выводы по третьей главе

1. Рассмотрено влияние концентрации гидросмеси на работу системы насос-пульпопровод и получены результаты имитационного моделирования, необходимость учитывать концентрацию твердой фазы для регулирования насоса.
2. Подтверждена теория результатами имитационного моделирования насосного агрегата с преобразователем частоты о целесообразности использования частотного регулирования при определенных частотах вращения двигателя электропривода.
3. Проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке с пульпами различных концентраций.
4. Проанализированы результаты и построены зависимости, показывающие критические параметры пульпы, при которых насосный агрегат будет работать с номинальным КПД либо с отклонением допустимых 5-10 %.

Рисунок 4.1 – Схема комплекса закладочных смесей из текущих хвостов
обогащения

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. 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 4.1).

4.2 Оценка эффективности системы гидротранспорта закладочных смесей

Система управления центробежным насосом, предложенная на рисунке 4.2, 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.

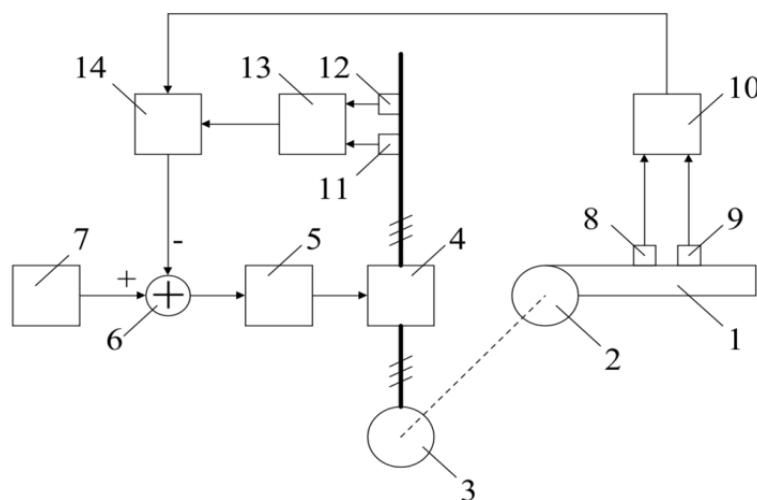


Рисунок 4.2 – Система управления насосом при транспортировке
закладочной смеси к закладочному комплексу

Изобретение относится к системам управления электроприводом центробежных агрегатов и может быть использовано для снижения затрат электрической энергии и износа оборудования при транспортировке жидкостей с переменными реологическими свойствами к закладочному комплексу горно-обогатительных предприятий.

Устройство снижает затраты электрической энергии на перекачку жидкости и износ электромеханического оборудования за счет динамической коррекции скорости электродвигателя в зависимости от фактических потерь энергии в насосном агрегате таким образом, чтобы величина этих потерь не превышала их значения в номинальном режиме работы [66].

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.

4.3 Выводы по четвертой главе

1. Предложена схема комплекса закладочных смесей из текущих хвостов обогащения, в которую помимо частотного регулирования насосного агрегата включены байпасные трубопроводы по твердой составляющей и воде.
2. Получена система управления насосом при транспортировке закладочной смеси к закладочному комплексу.
3. Предложены рекомендации по применению комбинированного способа регулирования насосного агрегата для закладочного комплекса.
4. Собрана имитационная модель на предприятии АО ВО «Электроаппарат», где перекачиваемой средой, заменяющей пульпу, была шестифтористая сера (SF_6).

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 концентрацией 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айрапетян, Л.Г. Разработка месторождений с закладкой выработанного пространства на зарубежных подземных рудниках / Л.Г. Айрапетян, В.Г. Гальперин, Я.И. Юхимов. - М. : Черметинформация, 1989. - 36 с.
2. Александров, В.И. Определение фактических потерь напора при гидротранспорте хвостов ММС по стальным и футерованным полиуретаном пульповодам на Качканарском ГОКе / В.И. Александров, В.А. Атрощенко, **А.М. Ватлина** // Обогащение руд. - 2021. - №.6. - С. 53-58.
3. Александров, В.И. Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидротранспорта / В.И. Александров, М.А. Васильева // Записки Горного института. - 2018. - Т. 233. - С. 471-479.
4. Александров, В.И. Вибродиагностика технического состояния грунтовых насосов / В. И. Александров, И. Собола // Записки Горного института. - 2016. - Т.218. - С. 242-250.
5. Анферов, В.Н. Имитационная модель оценки организационно-технологической надежности работы стреловых кранов / В.Н. Анферов, С.М. Кузнецов, С.И. Васильев // Изв. вузов. Строительство. 2013. - № 1- С. 70 - 78.
6. Анушенков, А.Н. Производство закладочных работ. На примере Таштагольского подземного рудника : учеб. пособие / А.Н. Анушенков. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016 - 136 с.
7. Анушенков, А.Н. Подземная геотехнология : учеб. пособие / А.Н. Анушенков, Б.А. Ахпашев, Е.П. Волков [и др.]. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, - 2017 - 304 с.
8. Байконуров, О.А. Подземная разработка месторождений с закладкой / О.А. Байконуров, Л.А. Крупник, В.А. Мельников. АН КазССР. Каз. политехн. ин-т им. В.И. Ленина. - Алма-Ата : Наука, 1972. - 384 с.

9. Балах, Р.В. Разработка месторождений с закладкой хвостами обогащения / Р.В. Балах. АН КазССР, Ин-т горного дела. - Алма-Ата: Наука, 1977. - 231 с.
10. Барон, Л.И. Характеристики трения горных пород. М.: Наука, 1967. - 208 с.
11. Бекаев, А.А. Повышение функциональной надежности гидропривода грузоподъемных устройств / А.А. Бекаев, Ю.В. Максимов, П.И. Строков, Т.В. Мусакова, А.В. Папонов // Известия МГТУ МАМИ. - 2014, №2. - с. 8-13.
12. 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.
13. 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.
14. Боголюбов, А.А. Опыт применения комбинированной системы разработки и показатели работы крупнейших подземных рудников за рубежом / А.А. Боголюбов, Л.А. Ермолаева. - М.: ЦНИИцветмет экономики и информ., 1991. - 64 с.
15. Бронников, Д.М. Основы технологии подземной разработки рудных месторождений с закладкой / Д.М. Бронников, Н.Ф. Замесов, Г.С. Кириченко, Г.И. Богданов. М.: Недра, 1973. - 200 с.
16. Бронников, Д.М. Закладочные работы в шахтах: Справочник / Под ред. Д. М. Бронникова, М. Н. Цыгалова. - М.: Недра, 1989. - 398 с.

17. Батурина, Е.М. Эффективность применения отходов глиноземного металлургического производства для приготовления закладочных смесей / Е.М. Батурина // Сборник трудов Всесоюз. науч.-исслед. горно-металлург. ин-та цветных металлов. - 1976. - № 27. - С. 86-89.

18. Вахрушев, Л.К. Исследование материалов и выбор оптимального состава закладочной смеси для условий Североуральского бокситового рудника: дис. ... канд. техн. наук / Вахрушев Леонид Константинович. - Свердловск, 1974. - 194 с.

19. Верюгин, Ю.А. Интенсификация приготовления закладочных мелкозернистых бетонных смесей / Ю.А. Верюгин, Н.И. Морозова, П.А. Антропов - Цветная металлургия, №8, 1975.-С. 33-35.

20. Виноградов, А.Б. Тяговое электрооборудование переменного тока карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 90 и 240 тонн / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, В.Л. Чистосердов, Н.Е. Гнездов, А.А. Коротков // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. КузГТУ: . - 2017. - С.303-309

21. Владимиров, Д.Я. Система управления горнотранспортным комплексом «Карьер»: основные направления, модернизация и развитие / Д.Я. Владимиров, А.Ф. Клебанов // Горное оборудование и электромеханика. - 2006. - No. 8. - С. 10-17.

22. Волощенко, В.П. Передовой опыт применения твердеющей закладки при добыче железных руд По материалам междруднич. школы / В.П. Волощенко, В.М. Горюнов, В.П. Драгунов и др. - Москва: Ин-т "Черметинформация", 1979. - 53 с.

23. Воробьев, А.С. Повышение эффективности гидротранспорта полидисперсных смесей / А.С. Воробьев // Горный информационно-аналитический бюллетень научно-технический журнал. 2015. - № 1. - С. 377-380.

24. Воронов, В.А. Снижение энергоемкости гидротранспортирования хвостов обогащения горных предприятий оптимизацией режимов работы грунтовых насосов и гравитационных сгустителей: дис. ... канд. техн. наук:

05.05.06 / Воронов Владимир Александрович. – СПб, 2007. - 190 с.

25. Вяткин, А.П. Твердеющая закладка на рудниках / А. П. Вяткин, В. Г. Горбачев, В. А. Рубцов. - М.: Недра, 1983. - 168 с.

26. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование механотронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. - СПб: КОРОНА-Век. - 2008. - 368 с.

27. Гертман, В.П. Влияние расхода воды и зернового состава заполнителей на качество закладки / В.П. Гертман, С.А. Агманских, К.Н. Светлаков // Горный журнал. - 1982. - № 5. - С. 28-31.

28. Гертман, Л.К. Твердеющая закладка на основе никелевых шлаков / Л.К. Гертман, С.А. Агманских, Т.А. Субботина // Труды Урал, научно-исслед. и проектного ин-та медной промышленности. - 1978. - Вып. 21.-С. 22-24.

29. Глебов, И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин/ И.А. Глебов. - Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1979. - 313 с.

30. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. - М.: Либроком, 2013 - 584 с.

31. Голушкевич, С.С. Статика предельного состояния грунтовых масс. - М.: Гостехтеориздат, 1957.-286с.

32. Горбачев, Б.Г. Определение мощности двигателей для погрузочных машин с нагребающими лапами // Транспорт горных предприятий. - М.: МГИ, 1963. -С. 100-105.

33. ГОСТ Р 27.013-2019 МЭК 62308:2006. Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности.

34. ГОСТ 31839-2012. Насосы и агрегаты насосные для перекачки жидкостей. Общие требования безопасности.

35. ГОСТ 32601-2013. Насосы центробежные для нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности. Общие технические требования.

36. Гребенюк, В.А. Справочник по горнорудному делу / В.А. Гребенюк, Я.С. Пыжьянов, И.Е. Ерофеев и др. - М.: Недра, 1983. - 816 с.
37. Демидов, Ю.В. Подземная разработка мощных рудных залежей / Ю. В. Демидов, В. Н. Аминов. - М.: Недра, 1991. - 204 с.
38. Джваршеншвили А.Г. Закладочное хозяйство шахт и рудников / А.Г. Джваршеншвили, В.А. Силагадзе, А.К. Инашвили, Ш.В. Шавгуладзе. - М.: Недра, 1978. - 280 с.
39. Емельянов, А.П. Электропривод машин и оборудования / А.П. Емельянов, В.И. Вершинин, А.Е. Козярук // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. - 222 с.
40. Жуматаев, А.К. Повышение надежности оборудования / А.К. Жуматаев, Р.О. Олжабаев // Наука и техника Казахстана. 2010. - №2 С. 52-54.
41. Закладочный комплекс [Электронный ресурс] / Г.П. Дмитриев // Геологическая энциклопедия. - Режим доступа: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geolog/1952/Закладочный.
42. Зеньков, И.В. Территориальные и технологические особенности добычи угля открытым способом в республике Вьетнам / И.В. Зеньков // Уголь. - 2018. - № 12 1113. - С. 102-104.
43. Зурков, Е.П. К вопросу моделирования технологического процесса закладочного комплекса: Подземная разработка мощных шлаков для изготовления твердеющей закладки / Е.П. Зурков // Горный журнал. - 1971. - № 6. - С. 45.
44. Зырянов, А.Г. Применение твердеющей закладки на рудниках Канады / А.Г. Зырянов, В.Т. Ковалевская // Цветная металлургия. - 1972. - № 11.-С. 10-12
45. Именитов, В.А. Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений / В.А. Именитов. - М.: Недра, 1978. - 309 с.

46. Иштуinov, Д.В. Q-H характеристик насосов с использованием аппроксимации методом наименьших квадратов / Д.В. Иштуinov, С.И.Охапкин // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2010. Вып. 3: в 5 ч. Ч.2 - С.23-28.
47. Кальницкий, Я.Б. Оценка гранулометрического состава горной массы с учетом требования ее погрузки / Я.Б. Кальницкий, М.Б Хадсан. // В кн.: Транспорт шахт и карьеров. М., 1971, с. 325-328
48. Капустин, Д.А. Факторы влияющие на надежность работы гидротранспортной системы / Д.А. Капустин, Р.Н. Сентяй, В.В. Швыров, М.В. Орешкин, В.П. Ермак // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. 2019. – 11 29 С. 67-70.
49. Квитка, В.В. Твердеющие закладочные смеси повышенной плотности / В.В. Квитка, В.Е. Сергеев, К. Троттер, А.П. Трезнюк // Горный журнал. -2001 г. №5, С. 33-35.
50. Коновалов, А.П. Закладочные работы на подземных рудниках и перспективы их совершенствования / А.П Коновалов., В.В. Аршинский, В.И. Хуцишвили и др.// Горный журнал. -2001 г. -№7, С. 3-7.
51. Коган, Е.И. Новая технология закладочных работ. / Е.И. Коган // Безопасность труда в промышленности. 1978, №7, С. 46-47.
52. Козярук, А.Е. Методы и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронными электроприводами / А.Е. Козярук, Б.Ю. Васильев // Вестник ЮжноУральского государственного университета. Серия: энергетика. - 2015. - No. 1. - С. 47-53.
53. Козярук, А.Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов / А.Е. Козярук // Электротехника. - 2019. - No. 3 - С. 33-37.
54. Козярук, А.Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горно-добывающих и транспортных машин / А.Е. Козярук // Записки горного института. - 2016. - Т. 218 - С. 261-269.

55. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин/ И.П. Копылов. -М.: Высш. шк., 1987. - 248 с.
56. Кравченко, В.П. Применение твердеющей закладки при разработке рудных месторождений / В.П. Кравченко, В.В. Куликов. - М.: Недра, 1974. - 200 с.
57. Крапивин, М.Г. Надежность горных машин и комплексов: Учеб. Пособие. / М.Г. Крапивин, Н.И. Сысоев -Новочеркасск:РИО НПИ, 1981.-56 с
58. Кузьмин, Е.В. Формирование закладочного массива на основе гипсосодержащего вяжущего / Е.В. Кузьмин, О.И. Савич // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2003.-№1.-С. 84-86
59. Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. – М.: Машиностроение, 2013. - 175 с.
60. Леонова, Л.Б. Разработка составов и технологии закладочных смесей для горных выработок на основе техногенных материалов Урало-сибирского региона: автореф. ...дис. канд. техн. наук. 05.17.11 /Леонова Лейла Борисовна Екатеринбург. - 1992. - 21 с.
61. Милкин, А.В., Опыт борьбы с подземными эндогенными пожарами и внедрение камерной системы разработки с твердеющей закладкой на Текелийском руднике / А.В. Милкин, В.М. Гулий, С.И. Джансугуров // М-во цв. металлургии СССР. Центр. науч.-исслед. ин-т информации и техн.-экон. исследований цв. металлургии. - М.: Б. и., 1967. - 47 с
62. Мясников, К.В. Применение твердеющей закладки при разработке рудных месторождений / К.В.Мясников, В.В.Руденко. - М.: Недра, 1964. - 160 с.
63. Назаркин, Э.Е. Сравнение существующих способов регулирования работы центробежных насосов / Э.Е. Назаркин // Аллея науки. - 2017. - №. 10 - С. 721-736.

64. Партин, И.А. Разработка методов динамического расчета тракта загрузки котлов установок непрерывной варки целлюлозы: дис ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Партин Илья Александрович. - Екатеринбург, 2018. - 187 с
65. Паршиков, А.М. К вопросу использования различных материалов для закладки выработанного пространства на угольных шахтах / А.М. Паршиков. - Донецк: Донец, ун-т, 1983. - 19 с.
66. 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.
67. Пермяков, В.Б. Оценка надежности работы гидротранспортных систем / В.Б. Пермяков, В.Н. Анферов, С.М. Кузнецов, С.И. Васильев // Системы. Методы. Технологии. 2013. - № 3 19 С. 25-34.
68. Поветкин, В.В. Совершенствование оборудования для транспортировки гидросмеси в обогащительном производстве / В.В. Поветкин, М.Ф. Керимжанова, Е.П. Орлова, А.З. Букаева // Горный информационно-аналитический бюллетень научно-технический журнал 2018. - № 6. - С. 161-169.
69. Покровская, В.Н. Пути повышения эффективности гидротранспорта / В.Н. Покровская. - М.: Недра, 1972. - 161 с.
70. Покровская, В.Н. Гидротранспорт в горной промышленности / В.Н. Покровская. - М., Недра, 1985, - 192 с.
71. Полонник, П.И. Технология пастовой закладки при подземной разработке руд / П.И. Полонник, О.И. Савич // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2001. - №3. С. 84-86.
72. Поспелов, А.А. Сравнительный анализ методик построения рабочих характеристик насосов с частотно-регулируемым электроприводом / А.А. Поспелов, В.Н. Виноградов, М.Ю. Зорин, Г.В. Ледуховский, Д.Г. Денисов // Вестник ИГЭУ. - 2007. - ВЫП. 2
73. Прокушев, Г.А. Использование скальных пород в технологии твердеющей закладки / Г.А. Прокушев. – Алма-Ата: Наука, 1988. - 192 с.

74. Репп, К.Ю. Влияние глинистых включений на прочность твердеющей закладки / К.Ю. Репп // Горный журнал. - 1981. - № 5. - С. 29-30.

75. Рустемов, И.А. Бесцементные твердеющие смеси для закладки подземных выработок / И.А. Рустемов, А.А. Пащенко, С.Х. Туляев // Строит, материалы и конструкции. 1988. - №1. - С. 15

76. Рыжевский, В.В. Основы физики горных пород: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. / В.В. Рыжевский, Г.Я. Новик - М.: Недра, 1984. - 359 с.

77. Савич, О.И. Подбор состава закладочной смеси на основе гипсосодержащих пород / О.И. Савич // Горный информационно-аналитический бюллетень, 1999. №8. -С. 66.

78. Савич, О.И. Разработка технологии подготовки гипсосодержащих вяжущих и формирование на их основе закладочных массивов: автореф. ...дис. канд. техн. наук. 25.00.22 / Савич Олег Игоревич. Моск. гос. гор. ун-т. - Москва, 2002. - 21 с.

79. Савич, О.И. Свойства закладки на основе гипсосодержащих пород / О.И. Савич // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2001. №8. - С. 43-45.

80. Силин, Н.А. Гидротранспорт угля по трубам / Н.А. Силин, Ю.К. Витошин. - Киев: Изд-во АН УССР, 1964. - 88 с.

81. Смирнов, К.А. Опыт применения твердеющей закладки на Гайском руднике / К.А. Смирнов, К.Ю. Репп. - М.: ЦИИНцветмет, 1966 - 74 с.

82. Смолдырев, А.Е. Технология и механизация закладочных работ / А.Е. Смолдырев. - Москва: Недра, 1974. - 327 с.

83. Смолдырев, А.Е. О режимах и параметрах течения гидросмесей измельченных горных пород. / А.Е. Смолдырев // Известия вузов. Геология и разведка. 1980, №1. С. 122-127.

84. Смолдырев, А.Е. Гидро-пневмотранспорт / А.Е. Смолдырев. - М.: Металлургия. 1967. 367 с.

85. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт. / А.Е. Смолдырев. Изд.3., перераб. и доп. - М.: Недра. 1980. 293 с.
86. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей./ А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов Машиностроение, - М., 1973. 208 с.
87. Смольский, В.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов. / В.М. Смольский, З.П. Шульман, В.М. Гориславец. - Минск. Наука и техника. 1970. 448 с.
88. Совершенствование техники и технологии складирования отходов в условиях комплексного использования недр: Сб. науч. тр. Межведомственный / Всесоюз. н.-и. и проект. ин-т мех. обраб. полез. ископаемых "Механобр". - Л.: ин-т "Механобр", 1984. - 163 с.
89. Трайнис, В.В. Исследование и разработка методов расчета гидравлического транспортирования угля по трубопроводам в турбулентном и вязко-пластичном потоках: автореф. ...дис. д-ра техн. наук. 174 / Трайнис Виулен Владимирович. – М., 1969. - 47 с.
90. Трайнис, В.В. Параметры и режимы гидравлического транспортирования угля по трубопроводам / В.В. Трайнис. - М., Наука. 1970. 192 с.
91. Уразаков, К.Р. Комплексный показатель надежности насосного оборудования / К.Р. Уразаков, А.С. Топольников // Нефтяное хозяйство. 2009 № 1 С. 78 – 81.
92. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. - М., Мир, 1964, - 216 с.
93. Фролов, А.Г. Гидротранспорт в зарубежной горной промышленности / А.Г. Фролов, В.В. Трайнис, Н.П. Пескова. - М.: Углетехиздат, 1958. - 43 с.
94. Хомяков, В.И. Зарубежный опыт закладки на рудниках / В.И. Хомяков. - М.: Недра, 1984. - 224 с.

95. Цыгалов, М.Н. Монолитная закладка на основе мартеновского шлака с активизаторами / М.Н. Цыгалов, В.И. Якубов, В.И. Шишкин // Горный журнал. 1976, - №12. - С. 33-35.
96. Черных, В.Г. Анализ надежности шахтной погрузочной машины как сложной технической системы / В.Г Черных //Горный информ.-аналит. бюлл., 2003.-№11.-С.155-158.
97. Юфин, А.П. Гидромеханизация / А.П. Юфин - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1974. - 223 с.
98. Bolshunova, O. Adaptive control system of dump truck traction electric drive / O. Bolshunova, A. Korzhev, A. Kamyshyan. - DOI 10.1088/1757-899X/327/5/052007 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - Tomsk, 2017 - Vol. 87.
99. 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. - 1946 . - 062004. DOI:10.1088/1755-1315/194/6/062004.
100. 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. - 17531 . - 012014. DOI:10.1088/1742-6596/1753/1/012014.
101. Kozyaruk, A. Improving the energy efficiency of the electromechanical transmission of an open-pit dump truck / A. Kozyaruk, A. Kamyshyan. - DOI 10.31897/PMI.2019.5.576 // Journal of Mining Institute. - 2019. - Vol. 239, № 5. - pp. 576 - 582.
102. 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. DOI:10.1051/e3sconf/201914004012.
103. 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. - 17281. - 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012029.

104. Frolov ,V.Y., Kvashnin A.O., Murashov I. V. Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering ElConRus.

105. Jan, A. Melkebeek. Electrical Machines and Drives. Fundamentals and Advanced Modelling. Cham Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018 P.442.

106. Murashov, I., Frolov V., Kadyrov A Development of the arc plasma torch operation mathematical model for spheroidization of fine-dispersed powders Journal of Physics: Conference Series 2018. - 10581 012024.

107. Ustinov, D. A., Gulkov Y. V. Forming mining processing plant ore-pulverizing milldrive starting characteristics International Journal of Applied Engineering Research 2016. - 1121 pp. 10559-10562.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Патент на изобретение



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**2 770 528** (13) **C1**(51) МПК
F04D 15/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F04D 15/00 (2022.02)

(21)(22) Заявка: 2021136113, 08.12.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
08.12.2021

Дата регистрации:
18.04.2022

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 08.12.2021

(45) Опубликовано: 18.04.2022 Бюл. № 11

Адрес для переписки:
190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., 2,
Санкт-Петербургский ГУ, Патентно-
лицензионный отдел

(72) Автор(ы):
Александров Виктор Иванович (RU),
Коржев Александр Александрович (RU),
Ватлина Анна Михайловна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2511934 C1, 10.04.2014. RU
2418990 C1, 20.05.2011. RU 2341004 C1,
10.12.2008. US 5844397 A1, 01.12.1998.

(54) СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ НАСОСОМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к системам управления электроприводом центробежных агрегатов и может быть использовано для снижения затрат электрической энергии и износа оборудования при транспортировке жидкостей с переменными реологическими свойствами к складочному комплексу горно-обогатительных предприятий. Техническим результатом является снижение потери энергии и износа центробежного насоса и его приводного двигателя при перекачке

жидкостей переменной плотности и вязкости. Устройство снижает затраты электрической энергии на перекачку жидкости и износ электромеханического оборудования за счет динамической коррекции скорости электродвигателя в зависимости от фактических потерь энергии в насосном агрегате таким образом, чтобы величина этих потерь не превышала их значения в номинальном режиме работы. 1 ил.

R U 2 7 7 0 5 2 8 C 1

R U 2 7 7 0 5 2 8 C 1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов



Утверждаю
Первый заместитель
генерального директора

Грицаев А.Н.

Дата «14» марта 2022 г.

АКТ (СПРАВКА) о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации Ватлиной Анны Михайловны по научной специальности 05.05.06 «Горные машины»

Рабочая комиссия в составе:

Председатель: Карпов А.Л.;

Члены комиссии: Григуть В.Н., Наумкин В.А.

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование параметров и режимов работы насосного оборудования комплекса получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в деятельности

АО ВО «Электроаппарат» при разработке системы управления электроприводом насосного агрегата насоса в виде:

- технических предложений по выполнению конструктивных схем;
- экспериментальных данных по исследованию;
- методик расчета и моделирования;
- эскизных проектов.

Использование указанных результатов позволяет:

- поддерживать КПД постоянным, ход рабочей точки в пределах 5-10%;
- отметить целесообразность применения способа регулирования насосного агрегата с включением байпасной линии.

Рекомендуется провести испытания установки, включающей грунтовый насос и перекачиваемую гидросмесь, т.е. соответствующие условиям реальной эксплуатации.

Председатель комиссии
Главный конструктор



Карпов А.Л.

Члены комиссии:
Главный технолог



Григуть В.Н.

Начальник бюро КРУЭ



Наумкин В.А.