



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ»
(МГРИ)

На правах рукописи

НЕКОЗ Ксения Сергеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИДРОКОМПЛЕКСОВ
ПУТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ИХ РАСХОДОМЕРАМИ
ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ С РАСШИРЯЮЩИМИ
УСТРОЙСТВАМИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ
ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ**

**Специальность 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и
строительная)»**

диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Дробаденко Валерий Павлович**

Москва – 2022

Содержание:

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	12
1.1. Обобщение опыта гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых	12
1.2. Способы измерения производительности гидрокомплексов, применяемых на предприятиях	21
1.3. Анализ контрольно-измерительной аппаратуры при гидротранспортировании	24
1.3.1. Определение расхода гидросмеси	24
1.3.2. Определение объемной плотности (концентрации) гидросмеси	27
1.4. Основные положения создания системы оперативного контроля и регулирования режимов работы гидрокомплексов приборами переменного перепада давления	31
Выводы по главе 1	33
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ РАСХОДОМЕРОВ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ	35
2.1. Анализ конструктивных устройств переменного перепада давления для измерения расхода жидкости	40
2.2. Анализ методов расчета расходомеров с сужающим устройством типа трубы Вентури	45
2.3. Основные гидродинамические факторы, влияющие на местные сопротивления в трубопроводах с изменяющимся сечением	48
2.4. Основные методические аспекты определения местных сопротивлений при движении потока гидросмеси с изменением сечения трубопровода	50
Выводы на главе 2	52
ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАСХОДОМЕРА С РАСШИРЯЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ ТИПА «ТРУБЫ АНТИВЕНТУРИ»	52
3.1. Обоснование методического обеспечения измерения производительности расходомера с расширяющим устройством	59
3.2. Аналитические исследования различных методов расчета местных гидравлических потерь давления в диффузорной части расходомера	59
3.2.1. Обоснование начального участка длины диффузора	59
3.2.2. Анализ различных методов расчета местных гидравлических сопротивлений	62
Выводы по главе 3	76

ГЛАВА 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТАРИРОВОЧНЫЕ	78
ИСПЫТАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ	
ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ.....	
4.1. Технологические аспекты опытно-промышленных исследований.....	78
4.2. Методическое и инструментальное обеспечение опытно-промышленных исследований.....	81
4.3. Особенности и результаты тарировочных испытаний расходомеров на промышленном трубопроводе при проведении экскаваторно-гидравлических работ в условиях ИГОКа.....	92
Выводы по главе 4.	103
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ОПЕРАТИВНОГО	105
УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОДОБЫЧЕЙ КОМПЛЕКСА «КАРЬЕР-ОБОГАТИТЕЛЬНАЯ ФАБРИКА»	
5.1. Эргономические факторы, реализуемые при внедрении системы оперативного управления гидродобычей карьера.....	105
5.2. Основные задачи и назначение системы оперативного управления гидродобычей карьера.....	106
5.3. Обустройство системы оперативного управления гидродобычей карьера.....	108
5.4. Разработка и эксплуатация кабины гидромониторщика.....	113
5.5. Разработка и эксплуатация пульта управления гидрокомплексом гидромониторно-грунтонасосной установки.....	115
5.6. Результаты апробации системы оперативного управления гидродобычей карьера.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Как показывает анализ гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых, применяемой в различных отраслях промышленности, эффективное использование этого способа во многом зависит от процесса гидротранспортирования насыпного материала. Прежде всего это объясняется такими его достоинствами, как поточность, высокая производительность, относительно низкая трудоемкость, малооперационность процесса, возможность совмещения его с другими технологическими операциями: обогащением, удалением в отвалы вскрышных пород и отходов обогащения, ведения закладочных работ, доставка строительных материалов и т. д.

Однако, наряду с этим, ему присущи также и недостатки: повышенный расход электроэнергии, значительный износ трубопровода и элементов механического оборудования, контактирующих с напорным движущимся потоком гидросмеси. Поэтому основными затратами на трубопроводный транспорт являются расходы на электроэнергию и амортизацию, достигающие в среднем соответственно 50% и 30% его себестоимости.

При гидротранспортировании твердых материалов удельный расход электроэнергии и износ трубопровода, в значительной степени, определяющие его эффективность, зависят от принятого проектного решения транспортирования (скорости движения гидросмеси и ее объемной концентрации). Оптимальные технико-экономические показатели зависят от принятых условий несущей способности движения потока гидросмеси (критической скорости), а также максимально возможной плотности (концентрации) гидросмеси, исключающие закупорку трубопровода и поддерживающие его безаварийную работу. Поэтому, режимы работы гидротранспортных систем на практике значительно отличаются от оптимальных и характеризуются повышенными скоростями движения гидросмеси, а также ее незначительной объемной плотностью.

Следствием такой нестабильной работы гидрокомплексов является:

- эксплуатация землесосов (грунтонасосов) с неустановившимися расходно-напорными характеристиками в нестабильном рабочем режиме;
- ухудшение показателей работы обогатительной фабрики по извлечению ценных компонентов;
- снижение производительности всего комплекса «карьер-обогатительная фабрика».

В связи с тем, что эксплуатация гидрокомплексов в изменяющихся условиях не происходит в оптимальных режимах, принятых при проектировании, возникает необходимость контроля и поддержания технологических параметров, наивыгоднейших для конкретных горнотехнических условий.

Общепризнано, что при гидротранспортировании твердых частиц наиболее целесообразным по затратам энергии режимом является такой, который соответствует, как было сказано выше, минимальной скорости движения гидросмеси без заиливания пульповода (критической скорости). При этом, как установлено практикой, для каждого типа гидросмеси существует максимально возможная объёмная концентрация. Некоторые специалисты считают рациональным режим перемещения гидросмеси с частичным заиливанием, когда поток движется практически с минимальными скоростями и наименьшим расходом гидросмеси, влияющими на увеличение срока службы транспортного трубопровода. Однако, в этом случае, перемещение кускового материала характеризуется значительными колебаниями технологических параметров и существует опасность закупорки негабаритными кусками.

Таким образом, для эффективной эксплуатации системы «гидрокомплекс – трубопровод» необходим непрерывный контроль и регулирование ее расходно-напорных характеристик. Отклонение расхода от заданных значений приводит к работе оборудования с повышенными скоростями, что обуславливает дополнительные затраты энергии, либо с пониженным скоростным режимом, часто приводящим к закупорке пульповода.

Основной задачей создания системы оперативного контроля и регулирования режимов работы гидротранспортирования является необходимость поддерживать расходно-напорные параметры в установленных границах в зависимости от конкретных горнотехнических условий гидромеханизированной разработки полезных ископаемых.

Цель работы

Повышение часовой производительности гидромеханизированного комплекса, а также извлечения ценных компонентов за счёт стабильной подачи гидросмеси на обогащение.

Идея работы

Эффективность гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых достигается измерительными устройствами переменного перепада давления - расходомером с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури» и гидростатическим плотномером гидросмеси, а также комплексом аппаратного обеспечения с автоматическим учётом фактического времени работы, регистрируемые параметры которых контролируются и регулируются на пульте управления в кабине гидромониторщика.

Задачи исследований

1. Проанализировать опыт гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых, а также способов и технических средств измерения параметров гидротранспортирования.
2. Определить методы расчета жидкости измерительными устройствами переменного перепада давлений в трубах с изменяющимися сечениями.
3. Обосновать использование гидродинамического расходомера переменного перепада давлений с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури» для измерения производительности гидрокомплекса по гидросмеси.
4. Проанализировать различные методы расчета местных гидравлических сопротивлений (потерь давления) в трубах с изменяющимися сечениями.

5. Провести промышленное тестирование при гидротранспортировании каолинизированных песков по трубопроводу с внутренним диаметром 410 мм по воде: диафрагмы ДК-25-450, трубы Вентури типоразмера 410/306 мм, трубы Антивентури 510/348 мм; а также по гидросмеси с объемными концентрациями 10÷20%, для расходомеров с сужающим и расширяющим устройствами.

Научные методы исследований

Для решения поставленных задач применялись анализ и обобщение практического опыта и литературных данных по гидромеханизированной разработке месторождений полезных ископаемых, обобщение и обработка материалов, полученных в ходе проведенных опытно-промышленных испытаний; аналитическое обоснование контрольно-измерительной аппаратуры и обработка результатов исследований с помощью стандартного программного обеспечения.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что коэффициент расхода μ , характеризующий потери давления, в трубе Вентури типоразмера 410/306 мм, равен 0,975 (по воде); однако при гидротранспортировании каолинизированных песков с объемной концентрацией гидросмеси 10÷20%, в результате абразивного износа суженной калибровочной части, уменьшается до значений, равных 0,91, что увеличивает погрешность измерений расхода гидросмеси в среднем на 6%; при этом технологический ресурс расходомера составляет ~110500 м³ (при наработке ~650 часов).

2. Пропускная способность транспортирования гидросмеси определяется гидродинамическим расходомером переменного перепада давлений с расширяющим устройством («трубой Антивентури») по установленному в работе уравнению часовой производительности с коэффициентом расхода $\mu=0,98$, и, в отличие от расходомера Вентури, со скоростями, минимизирующими абразивный износ внутренних стенок калибровочной части отбора давления.

3. При конструировании гидродинамического расходомера переменного перепада давления с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури»

необходимо учитывать, что в его диффузорной части потери давления, связанные с условиями вихреобразования, изменяются неоднозначно: при углах расширения α они возрастают многократно ($\sim$ в 6 раз), чем при степени расширения n ($\sim$ в 2 раза); оптимальными значениями являются $\alpha=5\div 7^\circ$ при соответствующих длинах диффузора $l_d=1,2 \div 1,45$ м.

Научная новизна работы

1. Установлено, что при измерении расхода гидросмеси, включающей каолинизированные пески, с объемной концентрацией 10÷20%, трубой Вентури ее технологический ресурс и наработка соответственно составляют 110500 м³ и ~650 часов по горной массе, вследствие абразивного износа суженной (калибровочной) части расходомера погрешность измерений повышается примерно на 6% (по сравнению с водой 2,5%).

2. Определено уравнение для производительности по гидросмеси расходомера с расширяющим устройством («трубой Антивентури») с коэффициентом расхода, равным 0,98, подтвержденным результатами промышленного тестирования при гидротранспортировании каолинизированных песков по пульповоду с внутренним диаметром, равным 410 мм.

3. Выявлены аналитические зависимости изменений значений потерь энергии (давления) в диффузоре расходомера «труба Антивентури» от углов расширения при различных его типоразмерах ($n=1,74\div 2,87$), определены оптимальные величины α , равные 5-7°, которые рекомендуются при конструировании измерительного устройства.

4. Установлено, что потери энергии, рассчитанные по различным методам, имеют завышенные значения (более 40%) по сравнению с установленными при промышленных испытаниях на пульповоде с внутренним диаметром 410 мм; для расходомера «труба Антивентури» с типоразмером $\frac{D}{d} = \frac{510}{348}$ мм с углом расширения 7° и степенью расширения $n = 2,15$ они составляют 2%.

5. Аналитическим путем установлены зависимости длины диффузора от угла расширения для различных типоразмеров расходомеров со степенями расширения от 1,74 до 2,87; определено, что с уменьшением угла расширения длина диффузора увеличивается и характеризуется малыми потерями энергии; однако сопровождаются значительными габаритными размерами, их массой, усложнением конструкции, монтажа и эксплуатации. Для диффузоров типоразмеров: $\frac{D}{d} = \frac{418}{317}$ мм ($n = 1,74$), $\frac{D}{d} = \frac{473}{351}$ мм ($n = 1,82$) с углом расширения $\alpha = 5-7^\circ$ оптимальная длина составляет $1,2 \div 1,45$ м.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы основаны на использовании широкого диапазона научных методов исследований, включающих анализ и обобщение теоретических и экспериментальных работ, обработке и анализе промышленных исследований и их сходимости с расчетными и практическими данными.

Научное значение работы

Обоснование производительности расходомера переменного перепада давлений с расширяющим устройством по гидросмеси с оптимальными геометрическими параметрами, минимизирующими потери энергии с коэффициентом расхода, равным 0,98, в комплексе системы оперативного управления режимами работы гидротранспортной установки.

Личный вклад автора

1. Обобщение практического опыта гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых в различных отраслях промышленности.
2. Анализ измерительных устройств, предназначенных для определения параметров гидротранспортирования твердых материалов.
3. Анализ конструктивных особенностей и гидродинамических аспектов расходомера переменного перепада давления.
4. Аналитические исследования потерь давления по различным методам расчета в трубах с переменным сечением.

5. Обработка и интерпретация результатов исследований по промышленному тестированию расходомера переменного перепада давлений.

Практическая ценность работы

Разработан методический подход для аналитического расчета производительности расходомера с расширяющим устройством типа трубы Антивентури, а также составлена номограмма, позволяющая определить потери энергии (давления) от геометрических параметров диффузора (угол расширения, степень расширения, длина диффузора) для различных типоразмеров $1 - \frac{D}{d} = \frac{418}{317}$ мм (n=1,74); $2 - \frac{D}{d} = \frac{473}{351}$ мм (n = 1,82); $3 - \frac{D}{d} = \frac{800}{580}$ мм (n = 1,9); $4 - \frac{D}{d} = \frac{510}{348}$ мм (n = 2,15); $5 - \frac{D}{d} = \frac{608}{359}$ мм (n = 2,87).

Реализация выводов и рекомендаций

Результаты проведенных исследований используются кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ для проведения лекций и практических занятий по предметам «Гидротранспорт и складирование горной массы», «Процессы открытых горных работ», а также для проведения практики студентов 2 курса.

Апробация работы

Результаты проведенных исследований докладывались на международных научно-практических конференциях: «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ)», (Москва, МГРИ, 2018); «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ, 2019); «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 2019); «Молодые – наукам о Земле» (Москва, МГРИ, 2020); «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 2021); «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ, 2021).

Публикации.

Основные результаты исследований и научные положения представлены в 8 опубликованных научных работах, 2 из них – в изданиях, рекомендованных

Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации (ВАК при Минобрнауки России).

Объем работы

Представленная диссертационная работа изложена на 134 страницах текста и состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 53 рисунка, 24 таблиц, список литературы из 94 наименований.

Автор выражает бесконечную признательность и благодарность научному руководителю – доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки РФ **Дробаденко Валерию Павловичу**, за постоянное внимание и неоценимую помощь в выполнении данной диссертации, а также всему коллективу кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ, за помощь, поддержку и консультации.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1.1. Обобщение опыта гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых

Многолетний опыт использования технологии и технических средств гидромеханизации при разработке осадочных, в т.ч. россыпных месторождений цветных, редких металлов и золота, при подземных и подводных работах, а также строительных материалов, при земляных работах – сооружение намывных плотин и дорожного полотна, показал и подтвердил в настоящее время их значимые достоинства. К ним относятся поточность технологических процессов, попутное обогащение транспортируемого материала, возможность высокой степени механизации и автоматизации процессов, малочисленный обслуживающий персонал, экологичность.

Развитие технологии гидромеханизированных работ отражено в работах известных ученых и специалистов [90, 51, 40, 6, 91, 38, 37, 60, 23, 24, 84, 28, 43, 85, 86, 87, 45] и других.

К предприятиям, на которых широко представлены гидромеханизированные технологии, относятся карьеры КМА, разрабатывающие железорудные месторождения. Так, разработка Лебединского месторождения в крупных масштабах ведется несколько десятков лет открытым способом с применением гидромеханизации на вскрышных работах и гидротранспортированием отходов обогащения [71].

В различные периоды работы на карьерах КМА использовались несколько технологических схем гидромониторно-землесосной и земснарядной разработки. Так, размыв вскрышных пород осуществляли мощными гидромониторами ГМД-350 и КУГУ-350/200, а гидротранспортирование осуществлялось землесосом 20Р-

11м по пульповоду диаметром 700 мм многоступенчатой системой (с тремя перекачками для песка и двумя для мела и суглинков). С 2004 г. горные работы осуществлялись по проекту ОАО «Центргипруда» с годовой производительностью более 3,6 млн.м³.

На Лебединском карьере применялась конвейерно-гидравлическая схема транспортирования полускальных пород, разрабатываемых роторным экскаватором ЭРГ-400/1000. Вследствие значительных простоев комплекса из-за налипания влажных меловых пород на конвейерную ленту конвейерный транспорт был заменен конвейерно-гидравлическим. Технологическая схема включала экскаватор ЭРГ-400/1000, забойный конвейер длиной 900 м, поперечный конвейер длиной 300 м, перегрузочный узел емкостью 1000-1500 м и гидротранспортный комплекс. Опыт работы в течении нескольких лет показал преимущество конвейерно-гидравлического транспорта по сравнению с конвейерным - годовая производительность комплекса увеличилась в 2 раза, а капитальные затраты на разработку снизились на 20-40%.

В связи с интенсивным развитием гидромеханизации наиболее удачное решение в размещении крупного объема пород Южно-Лебединского карьера было найдено при сооружении гидроотвала «Березовый Лог», который начал использоваться с 1965 года. Он предназначен для складирования пород горно-капитальной и эксплуатационной вскрыши Южно-Лебединского карьера. Одновременно складировали породы эксплуатационной вскрыши Лебединского карьера. Сложность строительства гидроотвала заключается в значительной проектной высоте (более 65 м), интенсивности намыва и больших объемах укладываемых пород (180-200 млн.м³) [6].

На Лебединском и Южно-Лебединском карьерах применялось несколько десятилетий также гидротранспортирование пород со скальными включениями. Для дробления негабаритных скальных включений во всасе землесосов была установлена роторная дробилка ДНП-1м, которая позволила загружать куски крупностью 500-600 мм. Крупность дробленных кусков – не более 150 мм.

При гидромеханизированной разработке вскрышных пород на угольных карьерах Кузбасса гидромониторно-землесосные комплексы отработали свыше 800 млн. м³ четвертичных пород.

Наибольшие объёмы гидровскрышных работ были достигнуты в конце 70-х годов, Ежегодно разрабатывалось по 25-27 млн. м³ вскрыши. Наибольшие объёмы были достигнуты на разрезе "Моховский" - 7769 тыс. м³.

Необходимо отметить, что гидромониторно-землесосными комплексами обычно отрабатываются обводненные, налипающие на стенки транспортных средств четвертичные вскрышные породы, разработка которых по традиционной (экскаваторной) технологии вызывает значительные сложности, при этом в отвале они часто вызывают оползни, обрушения и обвалы [43].

Разработка ведётся с применением железнодорожного транспорта, автотранспорта, бестранспортной схемы, средств гидромеханизации и комбинированной.

Наибольший темп роста эксплуатационных затрат соответствует комбинированной технологии разработки вскрыши и бестранспортной схеме, а наименьший - гидромеханизации, которая по мнению [43] имеет определённый экономический потенциал при разработке вскрышных пород на разрезах Кузбасса.

Гидромеханизированный способ применяется при комбинированной схеме разработки месторождений янтаря в Калининградской области на территории Самбийского полуострова.

Залежи янтаря приурочены к отложениям палеогена. Янтареносная толща пород представляет собой песчано-алевритистую сильно глинистую породу морского происхождения, состоящую из кварца, полевого шпата и глауконита. Благодаря глаукониту порода имеет голубовато-зеленый цвет, из-за этого янтареносная толща называется «голубая земля» [71].

В процессе разработки месторождений полезных ископаемых, различными проектными решениями было предусмотрено достижение проектной мощности (годовой добычи янтаря в количестве 450 т (2002 г.), 200 т (2007 г.).

В 2013 году добыча янтаря составила 312,8 т., добыча янтареносной породы – 197,3 тыс. м³, при этом вскрыша составила 2368,8 тыс. м³. Из этого объема гидромеханизированным способом осуществлялась добыча 967,4 тыс. м³.

Принятая проектом комбинированная (бестранспортно-транспортная) схема включает разработку 1-ого вскрышного уступа высотой 20-30 м, который размывается гидромониторами ГМД-350, а гидротранспорт – грунтонасосами.

На 1 уступе было предусмотрено два забоя, в каждом из которых работали 3 гидромонитора ГМД-250 (два в работе, один - в передвижке) и одна грунтонасосная установка типа ГрТ-4000/71 (20ГрУТ-8м). Забойные установки осуществляли транспортирование по трубопроводу Ду=720 мм на поверхность, где были расположены стационарные перекачивающие установки ГрТ-4000/71 (по одной на каждую забойную установку), осуществляющие дальнейший гидротранспорт пульпы в прибрежную зону Балтийского моря для рекультивации Пляжевого карьера и для наращивания волнозащитной ограждающей дамбы хвостохранилища. При этом длина карьерного пульпопровода (диаметр 700 мм) составляет 1470 м, а магистрального трубопровода – 3500 м.

Среднегодовая производительность грунтонасоса ГрУТ-4000/71 по горной массе составляла примерно 290 м³/час.

Добычной уступ разрабатывается комбинированным способом с применением драглайна ЭШ-5/45 для выемки «голубой земли» и разгрузки её в отвал для размыва гидромонитором ГМН-250 и транспортированием гидросмеси землесосной установкой ЗГМ-2м на узел обогащения, который расположен на расстоянии 1200-1500 м (в зависимости от местоположения землесосной установки в забое) по пульповоду с Ду=530 мм на высотную отметку +34,3 м. [71].

Крупномасштабные горные экскаваторно-гидравлические работы ведутся при разработке ильменитосодержащих россыпей Иршинской группы месторождений (ГОК), а также мощных редкометалльных залежей Малышевского месторождения на Верхне-Днепровском ГМК.

Технологическая схема на ИГОКе в различных периодах эксплуатации включала работу на вскрыше экскаватора ЭШ-10/60 по бестранспортной схеме с переэкскавацией. Продуктивные ильменитосодержащие каолинизированные отложения разрабатывались экскаваторно-гидравлическим комплексом. Выемка и рыхление промышленных песков осуществляется ЭШ-6/45, который выкладывает пески в навал к зумпфу забойной грунтонасосной установки ГрТ-1600/50. Пульпоприготовление производится размывом пород в навале и на грохоте приемного металлического зумпфа гидромониторной установки с дистанционным управлением ГМД-250с.

Подача гидросмеси на фабрику для первичного обогащения осуществляется одно-, двух-, трехступенчатой схемой гидротранспортной системой в зависимости от расстояния (от 1200 м до 4200 м). Диаметр пульповода изменялся от 350 мм до 500 мм. Среднегодовая производительность по добыче каолинизированных ильменитосодержащих песков составляла около 1 млн. м³/год.

Технологическая схема на фабрике облегченного типа включает промывку, обесшламливание и гравитационно-магнитное обогащение. Полученные черновые концентраты с содержанием ильменита около 55,5 % доставляются на стационарную доводочную фабрику.



Рис.1.1. Экскаваторно-гидравлическая разработка террасовой россыпи на ИГОКе.

На Верхне-Днепровском ГМК при рассмотрении вариантов организации внешнего транспорта редкометалльных песков институтом «Гиредмет» в свое время были предложены варианты конвейерного и гидравлического транспорта. В результате была принята в эксплуатацию технология, предусматривающая гидромониторный размыв горной массы из навала, создаваемого отвалообразователем ОТ-1600/120 (конвейерный транспорт от многоковшового экскаватора ERS-710) с дальнейшим гидротранспортированием двумя головными грунтонасосами ГрТ-4000/71 и перекачным 20Р-11м по трубопроводу диаметром 630 мм. Расстояние транспортирования на обогатительную фабрику 5400 м, высота подъема гидросмеси 57 м. На полное развитие карьера было спроектировано и сдано в эксплуатацию четыре таких линии – две рабочих, две резервных с общей годовой производительностью по горной массе 5 млн. м³.

Гидромеханизированный способ при производстве земляных работ несколько десятков лет на строящихся и эксплуатируемых гидроэлектрических и тепловых электростанциях проводит трест «Гидромеханизация», который ведет проектирование сооружений, конструирование, монтаж и изготовление оборудования, а также организацию работ.

В сложных климатических условиях проводились намывные работы Усть-Илимской ГЭС (р. Ангара), Зейской ГЭС (р. Зея), а также гидромеханизированная добыча нерудных материалов для строительства многих гидроузлов [84].

На базе минеральных ресурсов КМА выполнены работы в объеме более четверти миллиардов кубических метров, что обеспечило досрочное строительство и ввод в эксплуатацию вышеуказанных карьеров на базе месторождений КМА.

Значительный объем земляных гидромеханизированных работ произведен при строительстве высотной Асуанской плотины в Египте, а также на р. Евфрат в Сирии.

При этом были выявлены основные причины непроизводительной работы земснарядов:

отсутствие контроля за состоянием труб магистральных трубопроводов, износ которых при гидротранспорте гравелистого грунта был намного выше, чем при песчаных грунтах;

отсутствие контроля и регулирования параметров и гидротранспортирования земснарядами и перекачивающими станциями при работе в забое с грунтом, различного гранулометрического состава;

отсутствие оперативного учета при эксплуатации каждого земснаряда [84].

После устранения этих причин и усиления постоянного производственного контроля увеличился коэффициент использования рабочего времени основного земснаряда, намывающего «тело» плотин, в комплексе с тремя перекачивающими станциями, с 0,58 до 0,63. При этом значительно сократилось время не регламентных простоев и аварийных ремонтов.

Основное применяемое оборудование в разные периоды выполнения гидромеханизированных работ включало земснаряды, гидромониторные и забойные комплексы - гидромониторы ГМН-250, ГМД-300; забойные землесосы ЗГМ-2М, 20р-11; земснаряды 500-60м, 350-50л, ЗРС-Г, 350-50Т, 140-40К и др. При этом производительность земснаряда составила от 200 тыс. м³ до 1 млн. м³ в сезон.

Применение гидромеханизированного способа при производстве земляных работ в условиях Крайнего Севера осуществляет ЗАО «Уренгойгидромеханизация», который накопил огромный опыт реализации масштабных проектов в условиях вечной мерзлоты на объектах нефтегазового комплекса Ямало-Ненецкого автономного округа и Красноярского края, в том числе 33 млн. м³ на Заполярном, 26 млн. м³ на Ямбургском и других месторождениях, составляющих общий объем более 300 млн. м³ грунта.

В мировой практике нет аналогов применения гидромеханизации за Полярным кругом в больших масштабах. Развитие гидромеханизации в условиях Крайнего Севера обусловлено ее технологическими свойствами. На обводненных территориях в акваториях рек, стариц, озер на глубину до 25 метров залегают

песчаные грунты, разработка которых возможна только средствами гидромеханизации [84].

На добычу строительных горных пород в мировой практике приходится основная часть гидромеханизированной разработки полезных ископаемых. В промышленно развитых странах объемы подводной добычи весьма велики; так, в Японии на шельфовых месторождениях ежегодно добывается свыше 1 млрд т песка и гравия, которые используются для строительства и намыва прибрежных территорий [86].

Обычно глубина подводной выемки полезных ископаемых не превышает 20 – 30 м, но в отдельных случаях может достигать 60 м и более.

В Хабаровском крае из русловых месторождений добывается более 90 % песчано-гравийных материалов, в Амурской области — более 30 %. Кварцевые пески и песчано-гравийные смеси русловых месторождений Приамурья в основном, используются в транспортном строительстве для устройства дорожного полотна, а также после отсева крупных фракций в качестве мелкого заполнителя в строительные растворы и в сухие строительные смеси [86].

Подводную разработку земснарядным способом русловых месторождений песчано-гравийной горной массы ведут ОАО «Хабаровский речной торговый порт», ООО «Амуркварц» и ЗАО «Торговый порт Благовещенск». В Хабаровском крае подводная добыча осуществляется на 10 русловых месторождениях, в Амурской области - на двух месторождениях.

Наибольшие объемы добычи приходятся на несамоходные гидравлические земснаряды проекта Р-109, с технологической производительностью— 600 м³/ч (по добыче песка до 1000 м³/ч), максимальную глубину отработки месторождения — 12,5 м [86].

Из многочисленного опыта работы карьеров нерудной промышленности, разрабатывающих песчано-гравийный материал земснарядным способом, приведем примеры его использования только в Калининградской области на месторождении «Комсомольское».

Глубина добычного забоя в течение года составляла от 3,25 м до 14,87 м - в среднем по году 6,61 м.

Добыча песчано-гравийного материала производилась двумя земснарядами типа С-42 с землесосами ГрУТ-2000/63 (земснаряд П-552) и ГрУТ-3000/72 (земснаряд П-391) с подачей пульпы на три изолированных гравийно-сортировочных комплекса [86].

Добыча песчано-гравийного материала и удаление вскрышных пород осуществляется земснарядом С-42 с грунтонасосом ГрУТ-2000/63.

Аналогичная технология земснарядных работ и оборудование применяется и на других песчано-гравийных карьерах Калининградской области: «Пушкарево», «Рыбачье», «Куйбышевское», «Сиреневка» и других, с расстоянием транспортирования до 950 м [86].

Монголо-Российское «Предприятие Эрдэнэт» (ГОК Эрдэнэт) разрабатывает медно-молибденовое месторождение «Эрдэнэтийн Овоо», его главной целью является получение медно-молибденового концентрата. В структуру ГОКа входит обогатительная фабрика (ОФ) и хвостохранилище, которое обеспечивает ОФ водой и принимает конечный остаток переработки руд — хвосты. Хвостохранилище находится в 10 км на запад от г. Эрдэнэт и в 5—10 км на север от главного корпуса ОФ [45].

За период эксплуатации хвостохранилища намывная дамба достигла высоты 95 м, а в его объеме накоплено 617,07 млн. т. хвостов. Максимальная мощность хвостовых отложений составляет ~96 м.

Хвостовое хозяйство ОФ ГОКа имеет комплекс гидротехнических сооружений, включающий системы: гидротранспорта и гидравлической укладки хвостов, сооружений складирования хвостов, сооружений оборотного водоснабжения, сооружений охраны окружающей среды; а также мониторинговые станции наблюдений за состоянием дамбы и дренажные сооружения дамбы.

Эксплуатацией хвостохранилища сформированы большие пляжи, длиной более 3 км и общей площадью 1300 га. При сильных ветрах сухие отложения

пляжной и промежуточной зон образуют пылевые облака, которые распространяются на расстояние свыше 2 км. Поэтому предлагается для борьбы с пылящими хвостами разрабатывать и укладывать их земснарядом в опытный гидроотвал, расположенный на борту хвостохранилища [45].

1.2. Способы измерения производительности гидрокомплексов, применяемых на предприятиях

Как было рассмотрено в разделе 1.1 на многих предприятиях, ведущих разработку месторождений полезных ископаемых средствами гидромеханизации, отсутствует систематический текущий контроль параметров гидротранспортирования горной массы. Объемы добываемого минерального сырья в основном определяются маркшейдерской съемкой с достаточной на практике точностью, лишь при сравнительно длительной работе (декада, месяц).

К недостаткам этого способа можно отнести следующие факторы:

- коэффициент разрыхления разрабатываемых пород в отвале в зависимости для различных групп изменяется в большую или меньшую стороны.
- объемная масса пород для разных пород также величина неоднозначная, что вносит определенную погрешность в маркшейдерские расчеты.
- в отдельных случаях при сильной обводненности, порой затопленности, невозможно точно замерить выработанное пространство добычного уступа маркшейдерской съемкой.

Поэтому эти замеры практически не могут применяться для оперативного контроля: часовой, сменной или суточной производительности гидрокомплексов.

Так, при проведении экскаваторно-гидравлических работ (в т.ч. на ИГОКе) учет производительности (сменной, суточной, месячной) осуществляется следующими способами:

- по учёту количества рабочих циклов (ковшей) добычного экскаватора ЭШ-5/45, который осуществляется в соответствии с формулой:

$$V = Z_{ц} \cdot K \quad (1.1)$$

где V – объём добычи песка в целике за время (смена, сутки, месяц), m^3 ; $Z_{ц}$ – количество циклов экскаватора за время (по счетчику); K – коэффициент, учитывающий разрыхление породы в ковше и наполнения ковша ($K_n=0,9$, $K_p=1,1$): $K = E \cdot \frac{K_n}{K_p}$. Однако значения производительности экскаватора при выемке продуктивных песков и грунтонасосной установки за определённый конкретный промежуток времени не всегда могут совпадать [55].

Расчёт производительности фабрики по выпуску концентрата заключается в определении массы навески на пробоотборники за смену, и ее величина умножается на опытный коэффициент (на ИГОКе – 20), что дает сменную производительность обогатительной фабрики в тоннах. Специальным анализом определяются: β - содержание ильменита в концентрате; α - содержание ильменита в зернистой массе (исходное сырьё минус шламы $<0,07$ мм и галечные хвосты); θ - содержание ильменита в хвостах зернистой массы [55].

Далее определяется выход концентрата из зернистой массы по формуле:

$$\gamma_k = \frac{\alpha - \theta}{\beta - \theta} \cdot 100, \% \quad (1.2)$$

а также - переработка песков по фабрике (из зернистой массы):

$$Q_{\text{пер.э.м}} = \frac{Q_k}{\gamma_k} \cdot 100, \% \quad (1.3)$$

Недостатками данного способа определения переработки являются относительная его трудоёмкость и неточности, вытекающие из значительных колебаний величин опытных коэффициентов.

Возможно также определение величины переработки песков по величине добытого металла:

$$Q_{\text{исх}} = \frac{Q_{\text{мет}}}{\alpha_{\text{исх}} \cdot \varepsilon} \cdot 100, m^3, \quad (1.4)$$

где $\alpha_{исх}$ - содержание металла в исходных песках; ε - извлечение; $Q_{мет}$ - количество добытого металла. Однако достоверно определить $\alpha_{исх}$ и ε не представляется возможным.

– определение объёма добычи песков забойной установкой по количеству израсходованной электроэнергии.

При работе гидротранспортных установок (углесосов) на гидрошахтах Донбасса исследовался способ контроля режимов работы по параметрам приводного электродвигателя. Однако, погрешности определения режимов работы по силе тока (полного, активного, реактивного) в приводном электродвигателе составлял примерно 25-30%, что обусловлено зависимостью силы тока от колебаний нагрузки и напряжения сети.

Расчет переработки песков по количеству электроэнергии, расходуемой забойной грунтонасосной установкой, также проводился на карьере ИГОКа по формуле: $Q_{исх} = \frac{P}{2 \div 2,5} \cdot 100, м^3$, где P - расход электроэнергии забойной установкой, кВт/ч/смену; $2 \div 2,5$ - опытные коэффициенты при работе соответственно на песках и каолинах [55].

Недостоверность этого способа вытекает из неправомерности применения величин приведенных коэффициентов.

Опыт показывает, что при гидромониторно-землесосном способе контроль технологических процессов в основном ведется гидромониторщиком визуально (по уровню пульпы в зумпфе грунтонасоса или гидроэлеватора), либо по амперметру, показывающему нагрузку грунтонасоса по количеству израсходованной электроэнергии, по различным параметрам приводного электродвигателя.

Таким образом, применяемые способы контроля не позволяют объективно оценивать и анализировать работу гидрокомплекса в целом, точность таких методов невелика, так как постоянно меняются условия выемки и

гидротранспортирования пород. Кроме того, регулирование технологических параметров целиком зависит от опыта и навыков технического персонала.

При земснарядном способе разработки без контрольно-измерительной аппаратуры невозможно осуществлять даже визуальное наблюдение за ходом технологического процесса (подводной выемкой горной массы). По образному выражению д.т.н. Н.А. Иванова «...багермейстер работает как экскаваторщик с завязанными глазами...» [46].

1.3. Анализ контрольно-измерительной аппаратуры при гидротранспортировании

1.3.1. Определение расхода гидросмеси

В производственных условиях для разовых (контрольных) измерений расхода применяют несколько методов. Наиболее точным способом является объемный, широко распространенный в лабораторной практике, однако в производственных условиях он применяется ограниченно ввиду значительных размеров измерительных устройств, особенно при значительных расходах гидросмеси.

Способы измерения при помощи электролита или краски могут также применяться в тех случаях, когда необходимо только периодическое измерение расхода, причём более точным считается электролитический.

Для ориентировочных точных проверок измерений скорости потока возможен тензометрический скоростемер, разработанный в институте горной механики и технической кибернетики им. М. Федорова.

Для непрерывного измерения расхода гидросмеси в напорном гидротранспорте в производственных целях наиболее перспективными являются приборы, принцип действия которых основан на электромагнитной индукции [53]. При движении электропроводной жидкости в магнитном поле в ней возникает электродвижущая сила индукции, пропорциональная скорости её движения. На

основании этого, измерение расхода или скорости данного потока сводится к измерению индуцируемой э.д.с.

Комплект промышленного электромагнитного расходомера состоит из преобразователя расхода и измерительного блока. Первые осуществляют прямое преобразование объёмного расхода гидросмеси в электрические сигналы с использованием синусоидального магнитного поля частотой 50Гц и контактирующих с измеряемой средой электродов.

Конструктивно преобразователь выполнен из двух узлов - трубы и электролита. Они отличаются диаметром, изготовлением магнитных систем и покрытием.

Узлы трубы преобразователя всех типоразмеров имеют принципиально одинаковую конструкцию. Труба изготавливается из нержавеющей стали, внутренняя поверхность покрыта изоляционным материалом. В среднем сечении трубы диаметрально противоположно друг другу и заподлицо с поверхностью изоляционного покрытия в стенку трубы введены два электрода, изолированные от стенки трубы. По обе стороны трубопровода размещается система возбуждения магнитного поля так, чтобы электроды находились в середине зоны магнитного поля. В качестве покрытия используются резина, кислотостойкая эмаль, фторопласт.

Приборы имеют панель дистанционной поверки установки (положения нуля системы), а также проверки градуировки расходомера со стороны вторичного прибора.

В качестве вторичного прибора в комплекте расходомера используются приборы с дифференциально-трансформаторной схемой измерения.

Известны такие модификации электромагнитных расходомеров, как ИР-11, Индукция-51¹, РСЦ, СИМАГ-11, ВИСТ-ВС, LB4 и другие.

¹ (Расходомер Индукция-51 принят в данной работе в качестве тарировочного (раздел 4.3).

Расходомеры этого типа обеспечивают высокую точность измерения, показания не зависят от вязкости и плотности жидкости. К недостаткам можно отнести: подверженность в ходе эксплуатации электродов абразивному износу, необходимость в систематической тарировке и в создании специальных мер по компенсации колебаний питающей сети и подавлению различных наводок [53].

Отличительной особенностью группы *приборов, основанных на принципе измерения перепада давления*, является наличие или преднамеренное создание в трубопроводе с помощью специальных устройств разности давления, величина которой изменяется от расхода потока жидкости. Они изготавливаются таким образом, чтобы перепад давлений образовывался в двух смежных, близко отстоящих друг от друга, сечениях трубопровода. Измерение этого параметра осуществляется в большинстве случаев дифференциальными манометрами различных типов.

Из всех устройств переменного перепада давлений наиболее распространенными в гидравлическом отношении являются трубы Вентури, в которых отсутствуют расположенные внутри движущегося потока детали, вызывающие закупорку трубопровода. Основным недостатком таких приборов, работающих на гидросмесьях, являются сравнительно быстрое истирание калибровочных кромок и сужающих устройств твердыми частицами гидросмеси. Поэтому для точности измерения большое значение имеет постоянство проходного сечения трубопровода [1, 7, 28, 36, 55].

Более совершенным, по нашему мнению, является расходомер с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури».

Более подробно конструктивные особенности расходомеров переменного перепада давлений рассматривается в главе 3.1.

Измерение расхода гидросмеси ультразвуковым доплеровским методом базируется на смещении частоты звукового сигнала, отраженного от дискретных, неоднородных твердых фракций в движущемся потоке гидросмеси. Он дает возможность проведения измерений без непосредственного контакта с измеряемой

средой, осуществления градуировки без расходоизмерительных установок, работающих на измеряемой среде. Однако, при транспортировании неоднородной смеси, с включениями твердых частиц размером до 25-50 мм, в результате их столкновений между собой и ударов о стенки трубопровода, возникают акустические шумы довольно высокого уровня, что создает дополнительные помехи и существенно затрудняет контроль расхода гидросмеси. Кроме того, с увеличением массовой концентрации твердого в пульпе качественные характеристики транспортируемого материала влияют на измерения по-разному, так как тарировочные коэффициенты, зависящие от физических свойств пород, требуют соответствующей корректировки. Этот метод можно использовать для контроля расхода потоков гидросмесей мелких и тонкоизмельченных материалов [68].

Дискретно-непрерывный вероятностный метод измерения скорости движения твердой фазы пульпы базируется на применении статистического компьютерного аппарата распознавания локальных объемов твердых фракций (флуктуаций) для определения времени их движения в двух сечениях измерительного участка пульпопровода [69]. Он обладает сложной конструктивной и структурной базой, а также многоступенчатой функциональной схемой измерительных устройств и не вышел до настоящего времени из области испытаний.

1.3.2. Определение объемной плотности (концентрации) гидросмеси

Для измерения плотности гидросмеси известны конструкции плотномеров и регуляторов плотности, основанные на различных принципах работы: весовой, гидростатический, ультразвуковой, радиоактивный.

Методы и конструктивные особенности измерительных устройств, определяющих консистенцию (плотность) гидросмеси, отражены в классификациях, предложенных Н.А. Ивановым, С.Н. Шойхетом, В.Я. Корецким и

другими специалистами. Ниже приводится краткий анализ возможностей реализации некоторых из них при гидромеханизированной разработке месторождений полезных ископаемых.

Принцип действия *весовых плотномеров* основан на взвешивании постоянного объёма гидросмеси, протекающего через измерительное устройство. Они подразделяются на две группы. Работа первых основана на взвешивании частиц потока гидросмеси, отбираемой в отрезок трубы, отведённый от основного трубопровода. Ко второй группе - на взвешивании всего потока гидросмеси, движущегося по прямому или изогнутому трубопроводу. Основной недостаток – сложность и громоздкость конструкции (особенно при больших диаметрах пульповода), невозможность замера мгновенной концентрации пульпы. Недостатками этих плотномеров также являются: невозможность применения на гидросмесьях, представленных крупнозернистыми классами твёрдого, влияние на точность измерения давления и скорости движения гидросмеси, ввиду наличия манжетных соединений [69].

Гидростатический метод включает измерения перепада давления между двумя вертикальными сечениями измерительного участка пульповода, которые передаются через отбирающие устройства на дифманометр, преобразующий перепад в электрический сигнал, его показания прямо пропорциональны плотности пульпы, однако, тогда из общего перепада давления необходимо исключить потери напора по измерительному отрезку трубы. Гидростатический плотномер, разработанный институтом гидромеханики АН Украины (рис. 4.4), имеет относительно простую схему компенсации потерь напора перепада давления по длине измерительного участка [73]. Шаровой датчик конструкции К.В. Диминского уравнивает величину перепада давлений, вызванную движением по наклонному участку трубопровода чистой воды. Это осуществляется за счет регулирования угла наклона шара на определенную величину с тем, чтобы перепад от понижения давления при обтекании щелевого отверстия между шаром и трубопроводом был равен перепаду давления от потерь напора по длине

трубопровода, т.е. перепад равен 0. Таким образом, при подаче гидросмеси разность давлений обуславливается только массой твердых частиц.

На работу плотномера отрицательно влияет попадание воздуха в трубопровод и закупорка твердыми частицами отверстий для отбора давления. Для устранения этих недостатков применяют разделители различных конструкций (мембранные, эластичные и др.).

Ультразвуковой консистометр основан на использовании зависимости удельного акустического сопротивления пульпы или скорости распространения в ней ультразвука от содержания в ней твердых частиц. Однако, наличие в гидросмеси разных фракций твердых включений неоднозначно влияют на функциональную связь измеряемой величины и определяемых параметров консистенции пульпы, что значительно снижает точность показаний [24].

Принцип действия радиоактивных плотномеров различных конструкций основан на использовании явления поглощения гидросмесью пучка гамма-излучения при прохождении через слой жидкости, который затем попадает в приемник изотопного излучения – ионизационную камеру. Под действием ослабленного пучка излучения возникает электрический сигнал, функционально связанный с плотностью гидросмеси. Так как величина тока незначительна, он увеличивается многокаскадным усилителем. Устройство современных радиоизотопных приборов позволяет с помощью одного и того же прибора решать несколько разнородных технологических задач с использованием серийных радиоизотопных преобразователей. Их основным недостатком является зависимость показаний от физических свойств потока гидросмеси, что требует их индивидуальной градуировки, которая характеризуется сложностью тарировки и поверки. Для уменьшения погрешности, обусловленной статическим характером излучения радиоактивного источника, приходится увеличивать время проведения замера [24, 65, 68].

Способ измерения плотности гидросмеси *предложен И. Казанским*. Сущность метода заключается в измерении поля скоростей в поперечном сечении

напорного пульповода при помощи нескольких пар электродов, установленных на различной высоте этого сечения в зоне поперечного магнитного поля, создаваемого электромагнитами.

При движении воды поля её скоростей распределяются по гиперболическому закону симметрично относительно продольной оси пульповода. Наличие твердых включений искажает эпюру скоростей тем больше, чем выше плотность гидросмеси. Измеряя разность напряжений, возникающих между соответствующими парами электродов, определяется разность скоростей движения гидросмеси, однозначно связанная с ее консистенцией.

Недостатком данного метода является непосредственное воздействие гидросмеси на электроды, подверженность их абразивному износу, и сложность схемы измерений.

К приборам, основанным на *измерении электропроводности гидросмеси*, значения которой меняются в зависимости от количества в потоке твердых частиц, относятся магнитометрические, кондуктометрические, диэлькометрические устройства. Опыт их испытаний и эксплуатации показал, что они могут быть использованы только для отдельных разновидностей гидросмесей:

магнитометрический – применим для измерения консистенции гидросмеси с ферромагнитными включениями;

кондуктометрический – для различных суспензий и угольных пульп.

диэлькометрический основан на зависимости абсолютной диэлькометрической проницаемости (АДП) от степени ее насыщения твердой фазой. Например, для песчано-гравийных смесей АДП = 5,2ф/м, которая существенно отличается от воды (81ф/м) при $t=20^{\circ}\text{C}$. Замеры для пульп, содержащих глинистые фракции, значения АДП которых незначительно отличаются от воды, вызывают большие трудности и характеризуются значительными погрешностями [3, 40, 47, 51, 69].

1.4. Основные положения создания системы оперативного контроля и регулирования режимов работы гидрокомплексов приборами переменного перепада давления

Приведенный в разделе 1.3 краткий анализ различной контрольно-измерительной аппаратуры (плотномеров, консистомеров, расходомеров гидросмеси) показывает, что несмотря на их разнообразие, эксплуатационные качества выпускаемых приборов-датчиков неоднозначны. До настоящего времени они не применяются из-за сложности конструкций электронных схем, необходимости периодической корректировки «нуля» и последующей тарировки приборов из-за колебаний электрофизических свойств перекачиваемых гидросмесей, различных по своим физико-механическим свойствам. Сложность и трудность, а нередко и невозможность использования большинства из них при гидромеханизированной разработке месторождений, применения такой аппаратуры дополняются трудностями их монтажа в условиях работы передвижных гидрокомплексов, продвигающихся вместе с фронтом горных работ, а также необходимостью обслуживания указанной контрольно-измерительной аппаратуры высококвалифицированным персоналом.

В итоге все перечисленные факторы, включая их высокую заводскую стоимость, определяют значительные эксплуатационные затраты на их монтаж и обслуживание, что в условиях гидромеханизированной разработки является препятствием для создания системы оперативного контроля режимов работы гидрокомплексов.

Проведенный анализ показывает, что измерительные устройства расхода гидросмеси должны обеспечивать минимальное или полное отсутствие влияния характеристик транспортируемой среды на процесс и результаты измерений, что возможно без непосредственного контакта с измеряемой средой; а также проведение тарировочных поверок без расходомерных устройств, работающих в измеряемой среде.

В связи с этим для осуществления оперативного контроля и регулирования режимов работы гидротранспортных комплексов, по нашему мнению, целесообразно использовать контрольно-измерительную аппаратуру, работающую на принципе измерения переменного перепада давления, создаваемого в трубопроводе нестандартными устройствами: гидродинамическим расходомером – «трубой Антивентури» и гидростатическим плотномером. Целесообразность их применения, в первую очередь, обосновывается простотой, надежностью эксплуатации, отсутствием тарировочных поверок, возможностью изготовления нестандартного оборудования в условиях даже отдаленных месторождений, с достаточной для горных предприятий точностью измерений.

Одним из основных параметров, необходимых для эффективной эксплуатации гидротранспортных установок, является оперативный (непрерывный контроль) расхода и плотности транспортируемой гидросмеси, в итоге определяющий производительность гидроустановки по горной массе. Он связан прежде всего с решением задач по регулированию выбранных оптимальными параметрами движения гидросмеси по трубопроводу и эффективным режимом работы грунтонасоса при обеспечении минимального износа труб и соответствия между максимальной всасывающей и транспортной его способностью [1].

В итоге, производительность гидрокомплекса по твердому Q_T определяется по уравнению:

$$Q_T = Q_{\Gamma} S, \text{ м}^3 / \text{ч} \quad (1.5)$$

где Q_{Γ} - пропускная способность (производительность) по гидросмеси, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 S – объемная концентрация, %.

В принципе, регулирование режима работы грунтонасосного комплекса устанавливается значениями развиваемого напора, расхода, а также потребляемой мощности при определенных величинах скорости, расхода и объемной концентрации гидросмеси, т.е. при правильном графическом построении расходно-напорных характеристик и функционировании системы грунтонасос-пульповод.

Таким образом, эксплуатация должна осуществляться в зоне устойчивой работы грунтонасосной установки (а не на «кавитационных» хвостах) или при скоростях, значительно выше или ниже критических значений.

Основным функциональным назначением оперативного контроля параметров гидротранспортирования твердых материалов является поддержание эффективного режима движения гидросмеси со скоростями, близким к критическим, при максимально-возможных ее концентрации и к.п.д. агрегата.

Выводы по главе 1.

1. Проведены обобщение практического опыта и анализ применения гидромеханизированной технологии в различных отраслях горной промышленности: при разработке россыпных месторождений полезных ископаемых (янтареносной породы в Калининградской области, ильменитосодержащих россыпей Иршинского ГОКа и редкометалльных песков Верхне-Днепровского ГМК, медно-молибденового месторождения ГОК Эрдэнэт), железорудных месторождений КМА (Лебединский и Южно-Лебединский карьеры), угольных разрезов Кузбасса, при производстве земляных работ в условиях Крайнего Севера и добыче строительных горных пород.
2. На многих предприятиях, ведущих разработку месторождений полезных ископаемых средствами гидромеханизации, отсутствует систематический текущий контроль параметров гидротранспортирования горной массы.
3. Проведен анализ контрольно-измерительной аппаратуры: расходомеров (электромагнитных, ультразвуковых, переменного перепада давлений) и плотномеров и консистомеров (весового, гидростатического, ультразвукового, радиоактивного, основанного на измерении электропроводности гидросмеси и диэлькометрического).
4. Установлено, что вследствие сложности конструкции, монтажа и эксплуатации (особенно месторождений, расположенных в географически удаленных районах)

вышеприведённых устройств более целесообразным является применение приборов переменного перепада давлений, которые обладают простотой, надёжностью эксплуатации, отсутствием тарировочных поверок, возможностью изготовления нестандартного оборудования в условиях отдалённых месторождений, с достаточной для горных предприятий точностью измерений.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ РАСХОДОМЕРОВ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

2.1. Анализ конструктивных устройств переменного перепада давления для измерения расхода жидкости

К расходомерам переменного перепада давления (Δh) относятся измерительные устройства, основанные на функциональной зависимости Δh от расхода Q , транспортируемой горной массы (материала), создаваемого специальными неподвижными элементами, устанавливаемыми в трубопроводе [36].

Расходомеры имеют следующие отдельные узлы: преобразователи расхода, генерирующие перепад давлений в зависимости от расхода; соединительные элементы преобразователя с измерительным прибором; дифференциальный манометр, преобразующий перепад давлений в электрический сигнал, передаваемый на вторичный регистрирующий (самопишущий) прибор [53].

На практике из различного ряда расходомеров переменного перепада давления в большей степени получили применение расходомеры с сужающими устройствами, вследствие универсальности их применения, возможности изготовления в местных условиях из-за простоты конструкции, отсутствия необходимости в тарировочных расходомерных устройствах. Основным их недостатком является квадратичная зависимость между Q и Δh , следствием чего является неравномерность шкалы, а также не совсем большой диапазон измерений и дополнительные сопротивления движению потока: при работе на гидросмеси сравнительно быстро происходит истирание калибровочных кромок сужающих устройств твердыми частицами [1, 7, 8, 48, 65].

К стандартным (нормализованным) сужающим устройствам относятся диафрагмы, сопла, сопла Вентури и трубы Вентури, работающие по одному

принципу действия: при движении жидкости в трубопроводе с сужающим устройством, создается местное сопротивление (рис. 2.1) [1, 7, 8, 49, 61, 65, 86]. При переходе части потенциальной энергии давления в кинетическую, средняя скорость потока в суженном сечении повышается, вследствие этого статическое давление в данном сечении становится ниже аналогичного перед сужающим устройством. Таким образом, перепад давления в изменяющихся сечениях трубопровода характеризует расход транспортирующей жидкости и поэтому может являться мерой его измерения [48].

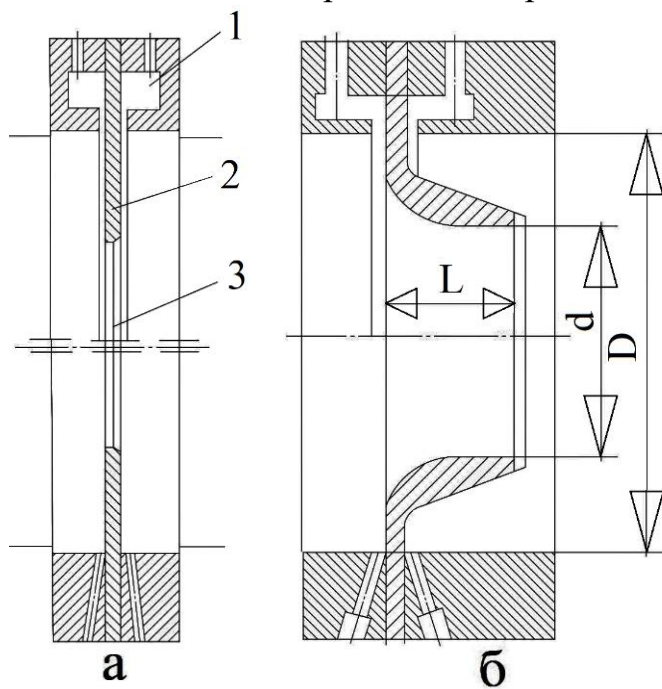
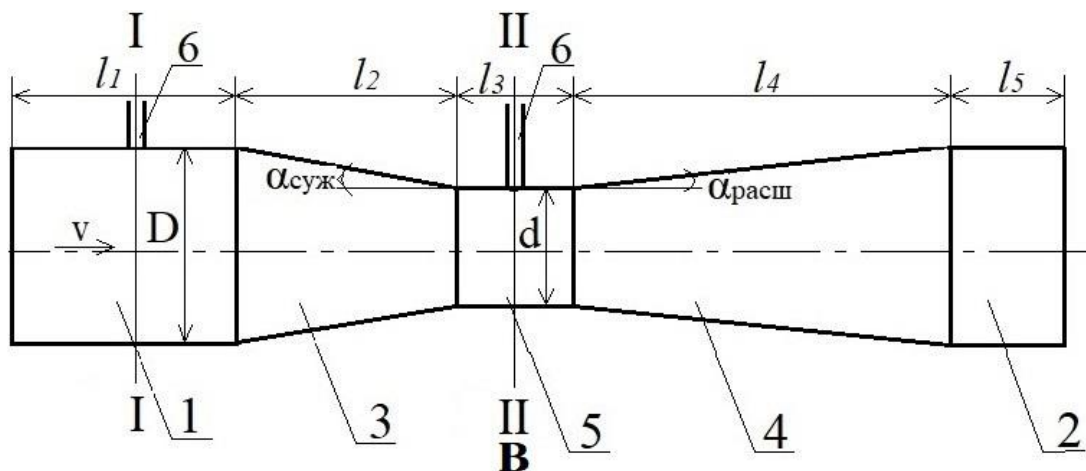


Рис.2.1. Стандартные сужающие устройства для измерения расхода жидкости [49]

а) диафрагма с камерным отбором давления (1 – камера, 2 – диск, 3 – отверстие);

б) сопло Вентури;

в) труба Вентури (1,2 – входной и выходной участки, 3 – конфузор, 4 – диффузор, 5 – цилиндрическая вставка (горловина), 6 – место отбора давления; $\alpha_{суж}$ – угол сходимости конфузора, $\alpha_{расш}$ – угол расширения диффузора, l_{1-5} – длины участков).



Сравнительные параметры расходомеров, применяемых в нефтяной промышленности показаны в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Сравнительные параметры расходомеров [63]

Тип расходомеров	$v_{\max}$	D	Погрешн., %	Δp	P
Переменного перепада давления:					
диафрагма	-	50-1000	1-3	0,015	10
сопло	-	50-500	1-3	0,001	10
Ультразвуковые расходомеры					
одноканальные	50	25-600	1	-	10
многоканальные	50	250-1800	0,5	-	10
Вихревые	50	50-250	0,5	0,04	10
Тахометрические расходомеры:					
Камерные с овальными шестернями	300	15-150	0,5	0,05	6,4
лопастные	100	25-250	0,5	0,05	6,4
турбинные	100	8-600	0,04	0,04	32

Условные обозначения к таблице 2.1:

$v_{\max}$ - максимальная кинетическая вязкость, $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

D – диаметр, мм;

Δp - потери давления, м.вод.ст.;

P - рабочее давление, Мпа.

Несмотря на простоту конструкции, применение диафрагм ограничивается тем, что они вызывают значительные потери напора. Кроме того, слабым местом диафрагмы является входная кромка, которая под действием текущего потока притупляется, что приводит к постепенному увеличению потерь давления (коэффициента расхода) и повышению погрешности измерений. Применение сужающих устройств в виде сопла и трубы Вентури вызвано необходимостью иметь простоту конструкции и достаточную точность измерения, а также малые потери напора [36].

Промышленные и лабораторные испытания показывают, что из всех сужающих устройств (диафрагм, сопел и т. д.) наиболее совершенными в гидравлическом отношении являются трубы Вентури. Они наиболее приемлемы для трубопроводного транспорта [7, 16, 88].

Практика применения расходомеров типа трубы Вентури показывает достаточную точность и надежность измерений при гидротранспортировании твердых частиц. В работах [1, 29, 73] отмечается, что труба Вентури как измерительное устройство не требует тарировки при условии изготовления ее согласно Правилам 21—54. Однако, для точности измерения расхода жидкости большое значение имеет постоянство проходного сечения трубы Вентури, которое может подвергаться абразивному износу в процессе ее эксплуатации.

По мнению многих специалистов [1, 28, 29, 59, 66, 91, 93], эти расходомеры наиболее приспособлены для гидротранспортирования твердых материалов. Они представляют собой устройство, состоящее из входного участка, внутренний диаметр которого равен диаметру трубопровода, конфузора - усеченного конуса с центральным углом сходимости $\alpha_{сх}$, суженной цилиндрической части (вставки), внутренний диаметр которой меньше диаметра входной части, диффузора - усеченного конуса, соединенного с выходным участком, диаметр которого равен диаметру трубопровода (рис. 1в).

В зависимости от условного диаметра в работах Силина Н. А., Пищенко И. А., Идельчика И.Е., Рабиновича Е.З. [73, 29, 66] приводятся технические характеристики труб Вентури, некоторые из которых показаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Технические характеристики труб Вентури [63]

Тип труб	Относительная площадь	Диапазон чисел Рейнольдса	Коэффициент истечения С	Средняя квадратическая погрешность σ , %
А	$0,15 \leq m \leq 0,5$ для трубопроводов $200 \text{ мм} \leq D \leq 1400 \text{ мм}$	$1 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5$	0,98	2,5
		$2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	0,985	1,5
		Более $2 \cdot 10^6$	0,985	2
Б	$0,1 \leq m \leq 0,6$ для трубопроводов $100 \text{ мм} \leq D \leq 800 \text{ мм}$	$1 \cdot 10^5 - 1,5 \cdot 10^5$	0,976	1,5
		$1,5 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5$	0,03	1
		$2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	0,984	1
		Более $2 \cdot 10^6$	0,984	0,7
В	$0,1 \leq m \leq 0,6$ для трубопроводов $50 \text{ мм} \leq D \leq 250 \text{ мм}$	$1 \cdot 10^5 - 1,5 \cdot 10^5$	0,977	2,5
		$1,5 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5$	0,992	1,5
		$2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	0,995	1
		Более $2 \cdot 10^6$	0,995	1,5

Условные обозначения к табл.2.2

D – диаметр трубопровода, мм;

m – относительная площадь сечения, м².

Трубы Вентури типа А имеют сварную конструкцию из стальных листов, типа Б литую конструкцию с обработкой только цилиндрической горловины. Трубы Вентури типа В идентичны трубам Вентури типа Б, однако в них обработаны все внутренние поверхности, кроме диффузора. Трубы Вентури могут быть длинными (наибольший диаметр выходного конуса равен диаметру трубопровода) и короткими (диаметр выходного конуса меньше диаметра трубопровода). Их устанавливают на измерительных трубопроводах диаметром 50-1400 мм. Статическое давление в трубах Вентури отбирают через кольцевые камеры, соединённые с внутренней полостью отверстий через отверстие диаметром 4-12 мм.

В таблице 2.3 приведены параметры труб Вентури, рекомендованные Институтом гидрологии и гидротехники Академии наук Украины [73].

Таблица 2.3

Рекомендуемые размеры труб Вентури [73]

№	D	d	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	$\alpha_{\text{суж}}, ^\circ$	$\alpha_{\text{расш}}, ^\circ$	L	m
1	900	700	400	500	300	1400	400	150	21,7°	8°	3000	0,603
2	800	600	600	500	300	1980	400	150	23°	8°	3780	0,562
3	614	517	400	330	300	800	400	150	21,7°	8°	2230	0,710
4	615	515	400	330	300	800	400	150	17°	8°	2230	0,700
5	615	515	300	500	300	900	300	150	11,4°	8°	2300	0,700
6	613	510	500	500	300	900	400	150	11,4°	8°	2600	0,695
7	509	413	440	320	210	830	150	130	17°	8°	1950	0,678
8	410	306	430	300	200	600	200	120	20°	8°	1730	0,555
9	300	256	900	120	300	460	400	260	21°	8°	2180	0,724
10	305	200	500	310	250	1000	400	300	20°	8°	2460	0,430
11	202	152	600	125	130	450	600	200	24°	8°	1905	0,567
12	202	129	600	200	150	570	600	200	20°	8°	2120	0,409

Условные обозначения к табл. 2.3:

d – диаметр трубопровода, мм;

D – диаметр расширенной части расходомера, мм;

- n – степень расширения;
 l_{1-5} – длины участков, мм (рис.2.1в);
 α – угол расширения, °;
 $\alpha_{\text{суж}}$ – угол сходимости конфузора, °;
 $\alpha_{\text{расш}}$ – угол расширения диффузора, °;
 m – отношение площади отверстия сужающего устройства S_0 к площади струи;
 L – общая длина трубы Вентури, мм.

2.2. Анализ методов расчета расходомеров с сужающим устройством типа трубы Вентури

Все расчетные методики различных специалистов для измерений расхода однородной жидкости основаны на совместном решении уравнения Бернулли и уравнения неразрывности потока в двух сечениях I-I и II-II.

Так, в методе расчета, предлагаемом Институтом гидрологии и гидротехники Академии наук Украины [73], ученые и специалисты которого проводили исследования труб Вентури по широкой программе с целью обоснования и адаптации их применения для неоднородных потоков жидкости, включающие твердые частицы, исходные расчетные уравнения представлены в следующем виде.

$$\frac{P_1}{g \cdot \rho_B} + \frac{a_1 \vartheta_1^2}{2g} = \frac{P_2}{g \cdot \rho_B} + \frac{a_2 \vartheta_2^2}{2g} + \zeta_{1-2} \frac{\vartheta_2^2}{2g} \quad (2.1)$$

$$\omega_1 \vartheta_1 = \varepsilon \omega_2 \vartheta_2 \quad (2.2)$$

где P_1 и P_2 - давление в сечениях I-I и II-II, м.вод.ст., v_1 и v_2 – средние скорости движения жидкости в сечениях I-I и II-II, м/с, т.е. $\vartheta_{\text{ср}} = \frac{Q}{\omega}$, но в величины кинетической энергии вводятся коррективы. Они зависят от формы эпюры распределения скоростей по живому сечению потока, которые называют коэффициентом Кориолиса. Так, если эпюра скоростей представляет собой прямоугольник (равномерная) $\alpha=1$; при треугольной и параболической $\alpha=2$; в

эпюрах, близких к трапецеидальной форме $\alpha=1,1$. В данной работе [73] они приравниваются к единице, т.е. $\alpha_1 \approx 1, \alpha_2 \approx 1$;

ρ_B – плотность жидкости, кг/м³;

ω_1 и ω_2 – площади поперечного сечения входного участка трубопровода и горловины, м²;

ε – коэффициент сжатия струи;

ζ_{1-2} – коэффициент потерь напора на трение в конфузорной части трубы.

Далее, в результате решения и трансформации уравнений предлагается основное уравнение расхода трубы Вентури в виде:

$$Q = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}} \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{2g \frac{\Delta h}{\rho_B} (\rho_{\text{раб}} - \rho_B)} \quad (2.3)$$

где μ - коэффициент расхода, принимается равным 0,96-0,98;

$\rho_{\text{раб}}$ – плотность рабочей жидкости, кг/м³;

Δh – потери напора в трубе Вентури между сечениями I-I и II-II.

И вводится обобщенный коэффициент расхода равный:

$$\alpha = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}}, \quad (2.4)$$

т.е. значения α зависит только от μ , т.к. множитель $\frac{\omega_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}}$ является

величиной постоянной, зависящей от соотношения площадей поперечного сечения горловины и входного участка трубопровода.

Далее авторы допускают, что μ может объединять все параметры, зависящие от изменения числа Рейнольдса Re : коэффициенты Кориолиса α_1 и α_2 ; коэффициент сжатия ε и коэффициент потери напора на трение в конфузоре ζ_{1-2} .

Непонятны причины, побудившие авторов применить такой подход. А вопросы, возникающие со значениями ζ_{1-2} предлагается решать со следующими допущениями: из уравнения Бернулли для сечений I-I и II-II (рис.2.1в) устанавливает величину μ по формуле:

$$\mu = \sqrt{1 - \frac{h_{\omega}}{\Delta h}}, \quad (2.5)$$

где h_{ω} – потери напора в трубе Вентури между сечениями I-I и II-II (рис. 2.1в). В монографии Института гидрологии и гидротехники Академии наук Украины отмечается, «так как нахождение h_{ω} непосредственно из опыта представляет непреодолимые трудности, то определяются общие потери напора H_{ω} во всей трубе, включая и диффузор. А при вычислении μ вместо h_{ω} принимают $\frac{H_{\omega}}{2}$, имея в виду, что такое допущение идет в запас» [73] и, по нашему мнению, не является оптимальным решением.

В принципе, такое же уравнение предлагается в работе Равинского Л. М. [27]:

$$Q = \alpha \mu \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{\rho_p} (\rho_{\text{раб}} - \rho_v)}, \quad (2.6)$$

где μ – коэффициент расхода, принимается равным 0,96-0,98;

$\rho_{\text{раб}}, \rho_v$ – плотность жидкости, кг/м³;

α – постоянная расходомера, зависящая от конструктивных размеров прибора и размерности величин, входящих в формулу:

$$\alpha = \frac{\omega_2 \sqrt{2g}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}}; \quad (2.7)$$

Аналогичные по структуре уравнения были получены при исследовании труб Вентури в работах Карасика В.М. [30] с коэффициентом $\mu = 0,98$, Лобачева В.Г. [41] для конических труб Вентури с коэффициентом μ приблизительно равным 0,99 при числах $Re \geq 2 \cdot 10^6$.

Некоторые авторы, как Чейшвили В.А. [88], Юфин А.П. [91], ссылаясь на опытные данные, считают возможным коэффициент расхода для гидросмеси применять постоянным и равным коэффициенту расхода для чистой воды [1].

В итоге, все перечисленные выше специалисты считают, что конические трубы Вентури при μ равном 0,97-0,98 не нуждаются в тарировке и могут быть использованы для измерения расхода гидросмеси с гарантированной точностью $\pm 2\%$. [1]

В работе Рабиновича Е.З. [66] расход жидкости предлагается определять по формуле (2.8) с коэффициентом расхода μ равным 0,94-0,96, который находится экспериментально:

$$Q_r = \mu \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}} \quad (2.8)$$

В работе Панарина В.В. [58] основные зависимости между массовым расходом Q_M и перепадом давления $(p_1 - p_2)$ для расходомеров с сужающими устройствами также получены из совместного решения уравнений Бернулли и закона сохранения энергии, которые имеют вид:

для массового расхода, кг/с:

$$Q_M = \alpha \cdot S_0 \cdot \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}, \quad (2.9)$$

где S_0 - площадь отверстия сужающего устройства.

для объёмного, м³/с:

$$Q = \alpha \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}. \quad (2.10)$$

где: α - коэффициент расхода сужающего устройства, который зависит не от типа протекающей жидкости, а, главным образом, от конструкции и относительной площади сужающего устройства и числа Рейнольдса.

$$\alpha = \frac{\mu \cdot \sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_b - k_a \mu^2 m^2}}, \quad (2.11)$$

где: μ – коэффициент сужения струи;

$$\psi = (p_a - p_b)/(p_1 - p_2), \quad (2.12)$$

ξ - коэффициент сопротивления, отнесенный к скорости в сечении на участке;

k_b и k_a - поправочные множители на неравномерность распределения скорости в соответственных сечениях;

m – отношение площади отверстия сужающего устройства S_0 , которое называют относительной площадью сужающего устройства к площади струи S_c :

$$m = S_0/S_c = (d/D)^2 \quad (2.13)$$

Расход гидросмеси трубой Вентури при работе земснарядов Шкундин Б. М. [89], а также Нурок Г.А. [51], предлагают определять по следующему уравнению:

$$Q = A \cdot \sqrt{\frac{h_T}{\gamma_{\text{п}}}}, \quad (2.14)$$

где:

h_T - перепад давления между сечениями, м.вод.ст.;

$\gamma_{\text{п}}$ - плотность пульпы, кг/м³;

A - постоянная водомера Вентури, не зависящая от $\gamma_{\text{п}}$ и равная

$$A = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \left[\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\right]}} \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{2g(\rho_{\text{раб}} - \rho_{\text{в}})} \quad (2.15)$$

где μ - коэффициент расхода водомера Вентури, принимаемый равным 0,97-0,98;

ω_1 и ω_2 - площадь в сечениях I-I и II-II; отношение ω_2/ω_1 принимается равным 0,5-0,8;

$\rho_{\text{р}}$ и ρ_0 - соответственно плотность рабочей жидкости дифференциального манометра и (воды), кг/м³;

h_T - перепад давления между сечениями I-I и II-II, м.вод.ст.;

$\rho_{\text{п}}$ - плотность пульпы, кг/м³.

В работе Подкопаева А.П. [63] расчёт сужающего устройства, расположенного на горизонтальном участке трубопровода (без учёта потерь энергии) также ведется на основе решения уравнения Бернулли и условия неразрывности потока жидкости и предлагается уравнение скорости потока:

$$c_2 = \frac{\psi}{\sqrt{1 - m^2 \mu_c^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p'_1 - p'_2)}, \quad (2.16)$$

где $m = F_0/F_1$ - модуль диафрагмы;

F_0 - площадь отверстия диафрагмы, м²;

p'_1 и p'_2 - давление в сечениях I-I и II-II;

ψ - поправочный коэффициент;

$\mu_c = F_2/F_0$ - коэффициент сужения струи потока.

Подставим c_2 в уравнение объемного расхода $Q = \mu_c F_0 c_2$ и введем коэффициент расхода, равный:

$$\alpha = \frac{\mu_c^2 \psi}{\sqrt{1 - \mu_c^2 m^2}} \quad (2.17)$$

В итоге уравнение объемного расхода для несжимаемой жидкости составит:

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p'_1 - p'_2)} \quad (2.18)$$

Кроме того, отмечается, что коэффициент расхода α не зависит от типа протекающей жидкости. На него влияют геометрические размеры сужающего устройства, а также число Рейнольдса.

Таким образом, методический подход к определению параметров расходомера с сужающим устройством типа трубы Вентури, в представленных выше уравнениях, предлагаемых многими специалистами, дается на основе уравнения Бернулли, но при этом не учитываются конкретно *местные сопротивления*, возникающие при изменении сечения трубопровода при течении жидкости, а все факторы, связанные с ними, предлагается объединить в коэффициент расхода. При этом многие из них априори считают его значения равными 0,92-0,98 или рекомендуют определять экспериментальным путем.

2.3. Основные гидродинамические факторы, влияющие на местные сопротивления в трубопроводах с изменяющимся сечением

При движении потока жидкости с изменяемым сечением трубопроводов, в т.ч. через фасонные части (задвижки, обратные клапаны, поворотные колена), возникают местные гидравлические сопротивления, которые отличаются от сопротивлений трения, распределяющихся равномерно по длине трубопровода. Они вызываются изменениями конфигурации движения потока жидкости: изменениями скорости движения по назначению (сужение и расширение) и направлению (колена, тройник). Некоторые специалисты, в том числе Идельчик И.Е. [28], считают эти факторы аналогией с ударом в твердых телах, которые с

механической точки зрения также характеризуются внезапным изменением скорости. В реальности, при смешении двух потоков жидкости не происходит никакого удара, однако общим является то, что в обоих случаях имеют место потери скоростей [1].

На рис. 2.2 показаны изменения конфигурации движений потока жидкости в различных изменяемых сечениях в трубопроводах: при внезапном расширении (рис. 2.2а) и сужении (рис. 2.2б), а также при плавном сужении - конфузоре (рис. 2.2в) и плавном расширении - диффузоре (рис. 2.2г) [26].

Основными геометрическими параметрами при этом являются: угол сходимости (конфузор) $\alpha_{\text{суж}}$ или угол расширения (диффузор) $\alpha_{\text{расш}}$, l_d - длина диффузора или l_k - длина конфузора, а также степень (коэффициент) расширения $n=S_1/S_2$ где S_1 и S_2 - соответственно площади узкой и широкой части трубопровода либо коэффициентом сжатия (заполнение сечения).

При изменении сечения трубопроводов (сужении или расширении) вследствие искривления линий тока и появлений при этом центробежных сил может происходить даже отрыв потока от внутренних стенок и, связанное с ним вихреобразование, которое является основной причиной возникновения значительных местных гидравлических сопротивлений.

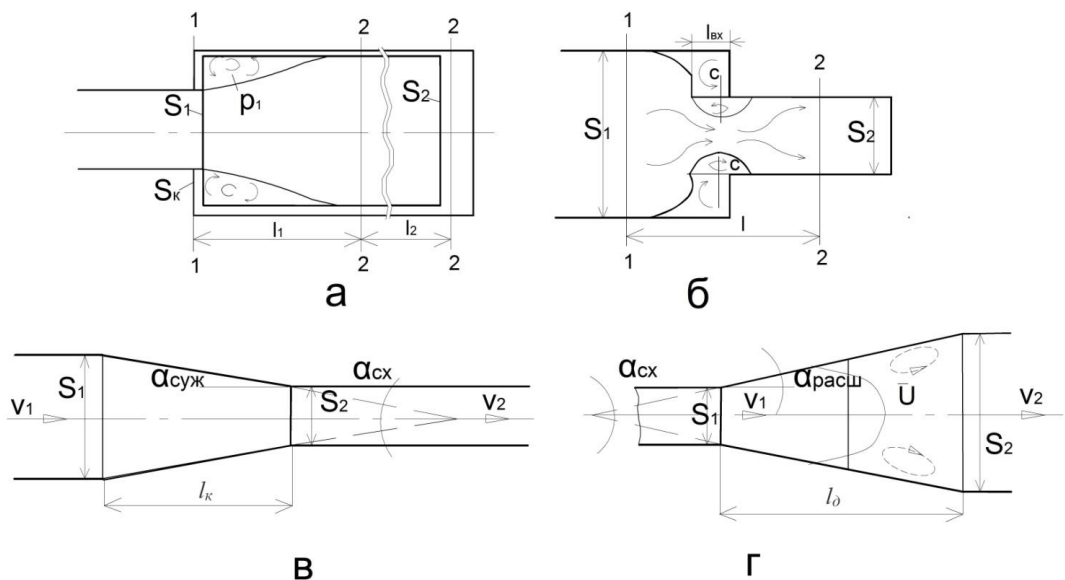


Рис. 2.2. Местные гидравлические сопротивления, возникающие при внезапном и плавном расширении и сужении потока жидкости в трубопроводе [26].

При внезапном расширении потока при переходе из суженной части трубопровода в более широкую образуется струя, отделенная от остальной жидкости поверхности раздела, которая быстро распадается и свертывается в различные локальные вихри. Для их стабилизации требуется определенный отрезок трубопровода $\approx (8-12)D_2$, D_2 – диаметр расширенного участка трубопровода. При этом с затуханием вихреобразования происходит перемешивание начальной струи с окружающей жидкостью и скорость может приближаться к равномерной [28].

В расширяющихся участках потока (диффузорах) при движении жидкости с уменьшенными скоростями (рис. 2.2) возникает увеличение давления (по Бернулли). Такое изменение давления по длине диффузора l_d затрудняет поступательное движение частиц жидкости, особенно у стенок [57].

Исследования показали, что при выходе струи из суженной части трубопровода возможно образование отрыва потока от стенок и пространство между струей и стенками заполняется вихрями [74].

В зависимости от движения гидросмеси режим течения может быть ламинарным при $Re < 2130$ и местные сопротивления при этом пропорциональны первой степени средней скорости либо турбулентным при $Re > 2130$ (квадратичная зависимость) [28].

Как известно, в общем случае, величина сопротивления (потери давления) Δp определяется следующим образом:

$$\Delta p = \zeta_1 v + \zeta_2 v^2, \quad (2.19)$$

где ζ_1 и ζ_2 - коэффициенты местного гидравлического сопротивления;

v – средняя скорость, м/с.

При определенных значениях числа Рейнольдса ламинарное и турбулентное движения переходят в переходный режим, который характеризуется отношением силы инерции к силам вязкости. При небольших значениях Re под действием вязкости слой движущейся жидкости, непосредственно прилегающий к внутренней поверхности трубопровода, как бы прилипает к ней. В этой области вблизи

внутренних стенок устанавливается переменная по сечению скорость, которая повышается от нуля до средней скорости потока. Эту зону переменной по сечению скорости называют пограничным слоем, толщина и длина начального участка l которого зависит от числа Рейнольдса и движение также может быть ламинарным либо турбулентным. В качестве характерного линейного размера пограничного слоя обычно принимается толщина слоя δ

$$Re_{\Pi} = \frac{\vartheta \delta}{\nu} \quad (2.20)$$

В пределах участка, равного $(25 \div 50)D$ - диаметра трубопровода толщина пограничного слоя в зависимости от скорости увеличиваться или уменьшаться. При этом возрастает давление вдоль потока и утолщение пограничного слоя, а во втором случае – уменьшение его и градиента давления [28].

2.4. Основные методические аспекты определения местных сопротивлений при движении потока гидросмеси с изменением сечения трубопровода

При внезапном изменении сечения потока жидкости в трубопроводе на примере сужающего устройства - диафрагмы в работе А.Д. Альтшуля [1] и других исследователей [28, 47, 59, 62, 67, 68] отмечается, что местные потери напора h можно представить в виде суммы потерь напора на сжатие потока $h_{сж}$ и на его последующее внезапное расширение $h_{вн.р.}$, т.е.

$$h = h_{сж} + h_{вн.р.} \quad (2.21)$$

Используя формулы Вейсбаха Ю. (2.22) и (2.23) [1]:

$$\Delta p_m = \zeta \frac{\rho \vartheta^2}{2}, \quad (2.22)$$

$$h_m = \zeta \frac{\vartheta^2}{2g}, \quad (2.23)$$

где Δp_m - местные потери давления, м.вод.ст.;

h_m - местные потери напора, м.вод.ст.;

ζ – коэффициент местного гидравлического сопротивления;

ϑ – средняя скорость (как правило, после прохода через местное сопротивление), м/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Используя теорию неразрывности, общее уравнение для определения коэффициента местных сопротивлений при внезапном изменении сечения потока имеет вид:

$$\zeta = \zeta_{сж} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2 \varepsilon} \right)^2 + K \left(\frac{\omega_1}{\omega_2 \varepsilon} - 1 \right)^2 \quad (2.24)$$

где ζ – коэффициент местных гидравлических сопротивлений;

ω_1 и ω_2 – площади поперечного сечения входного участка трубопровода и горловины, м²;

ε – коэффициент сжатия струи;

K – поправочный коэффициент, учитывающий влияние различных факторов (вязкости, силы Кориолиса и другие).

$\zeta_{сж}$ – коэффициент потерь напора на трение в конфузорной части трубы.

Однако, учитывая, что в производственных условиях в большинстве случаев напорное гидротранспортирование характеризуется значительными числами Рейнольдса, когда потери напора при сжатии потока, связанные с незначительными силами вязкости по сравнению с потерями на внезапное расширение струи, имеет место функциональная зависимость (теорема Ж.Ш. Борда) [1]:

$$\zeta = K \left(\frac{\omega_1}{\omega_2 \varepsilon} - 1 \right)^2 \quad (2.25)$$

где ζ – коэффициент местных гидравлических сопротивлений;

ϑ – средняя скорость (как правило, после прохода через местное сопротивление), м/с;

ω_1 и ω_2 – площади поперечного сечения входного участка трубопровода и горловины, м²;

ε – коэффициент сжатия струи;

K – поправочный коэффициент, учитывающий влияние различных факторов (вязкости, силы Кориолиса и другие).

Решение этой функции устанавливается методами теоретической гидромеханики различными исследованиями - Г.Л.Ф. Гельмгольца, Г. Кирхгофа,

Ж.В. Буссинска, А. Навье, Рузского, Н.Е. Жуковского и другими, на основании которых можно установить теоретическое значение коэффициента сжатия для местных гидравлических сопротивлений.

Выводы на главе 2.

1. Проведен анализ контрольно-измерительных устройств, основанных на принципе переменного перепада давления (диафрагма, сопло и труба Вентури).

2. На основе анализа контрольно-измерительных устройств напорного гидротранспортирования пород выявлено, что рациональными для гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых являются приборы переменного перепада давления, но в практике наиболее распространена труба Вентури, которая отличается простотой конструкции и монтажа, не требует тарировочных поверок и обладает достаточной точностью и надежностью измерений.

3. Проанализированы методы расчета расходомера с сужающим устройством типа трубы Вентури различных ученых: Института гидрологии и гидротехники Академии наук Украины (2.3), Равинского Л. М., Зелепукина Н. П. (2.6), Рабиновича Е.З. (2.8), Чейшвили В.А., Юфина А.П., Панарина В.В. (2.9, 2.10), Шкундина Б. М. и Нурока Г.А. (2.14), Подкопаева А.П. (2.18).

4. В результате анализа выявлено, что при расчете расхода не учитываются местные сопротивления, возникающие при изменении сечения трубопровода, а все факторы, связанные с ними, включая геометрические размеры сужающего устройства, предлагается объединить в коэффициент расхода μ , значение которого априори принимают равным 0,92-0,98 либо рекомендуется определять его экспериментальным путем.

5. Проведен анализ влияния гидродинамических факторов, под влиянием которых возможны отрыв потока от внутренних стенок и вихреобразование, на местные гидравлические сопротивления, возникающие при изменении сечения

трубопровода.

6. Проанализировано, что местные потери устанавливаются по теориям Ю.Вейсбаха и неразрывности потока, а также теоремы Ж.Ш. Борда.

ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАСХОДОМЕРА С РАСШИРЯЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ ТИПА «ТРУБЫ АНТИВЕНТУРИ»

3.1. Обоснование методического обеспечения измерения производительности расходомера с расширяющим устройством

Прототипом расходомера переменного перепада давления с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури» (в отличие от Вентури) по внешнему конструктивному оформлению можно считать прибор В. В. Длоугого, разработанный для измерения консистенции гидросмеси на наклонном участке всасывающего трубопровода земснаряда [73].

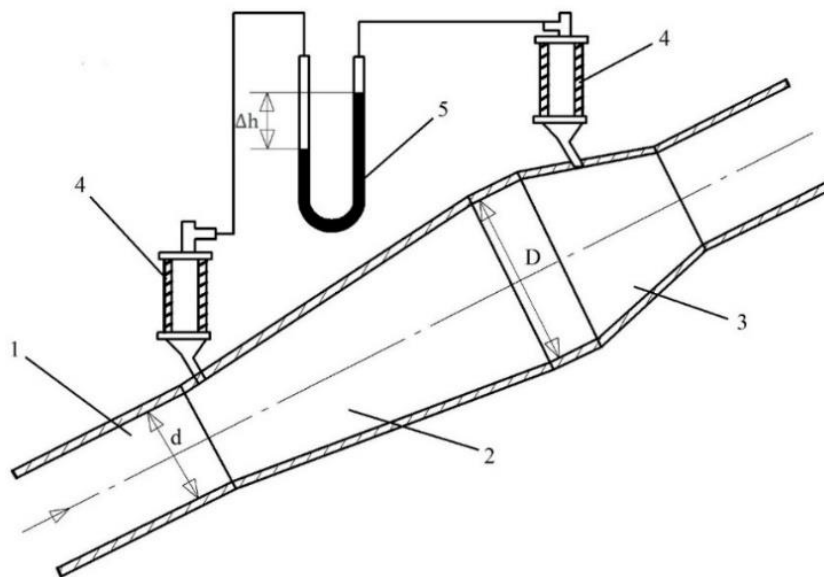


Рис.3.1. Схема консистометра конструкции В.В. Длоугого. 1 – всасывающий патрубок земснаряда, 2 – диффузор, 3 – конфузор, 4 – разделитель, 5 – диффманометр (d и D – площади поперечного сечения входного участка трубопровода и расширенной части расходомера) [73].

Он предложил измерительное устройство для определения консистенции гидросмеси (рис. 3.1) по перепаду давления на наклонном участке всасывающего трубопровода землесоса. Отличительная его особенность - компенсация потерь напора по длине измерительного участка происходила с помощью расширяющейся вставки. Место отбора давления в верхней точке подбиралось с таким расчетом,

чтобы перепад давления, соответствующий потерям напора на трение по длине трубы при движении воды, был равен перепаду давления от изменения скоростного напора за счет снижения скорости в расширенной части устройства. Измерения проводились с помощью специального ртутного дифманометра с сельсинной передачей показаний прибора на пульт управления земснарядом, который имел устройство автоматического ввода поправки на переменный угол наклона трубопровода к горизонту, меняющийся по мере подводной разработки грунта земснарядом.

Расчетное уравнение для определения плотности гидросмеси при заполнении импульсных трубок водой предлагалось определять [73]:

$$\rho_{\Gamma} = \frac{\Delta h(\rho_{\text{раб}} - \rho_{\text{В}})}{L \cdot \sin \alpha} + \rho_{\text{В}}, \quad (3.1)$$

где Δh - разность уровня рабочей жидкости в дифманометре, м;

$\rho_{\text{раб}}$ - плотность рабочей жидкости в дифманометре, кг/м³;

L - длина измерительного участка трубопровода, м;

$\rho_{\text{В}}$ - плотность воды, кг/м³;

α - угол наклона трубопровода к горизонту, °.

Опытные испытания при работе земснаряда на вскрышных работах показали, что прибор нуждается в дополнительной доработке. Дальнейшего использования этого прибора в производстве в литературе не имеется.

В дальнейшем, конструкция измерительного устройства, предложенная В.В. Длоугим, для измерения плотности гидросмеси была несколько видоизменена, так как функциональным назначением его являлось измерение расхода гидросмеси.

Конструкция расходомера типа «трубы Антивентури» также включает диффузор, прямолинейный участок и конфузор. Гидросмесь поступает в устье диффузора, из-за увеличения площади переменного сечения скорость ее движения уменьшается, а статическое давление растет. В конфузоре поток сжимается и скорость увеличивается до начальной. В отличие от трубы Вентури, где скорости твердых частиц в сужающем участке увеличиваются относительно начальных

скоростей в трубопроводе, в расширяющем устройстве расходомера «Антивентури» твердые частицы движутся с меньшими скоростями, что значительно уменьшает износ устройства и повышает срок его эксплуатации [25].

Основными отличиями гидродинамического расходомера типа «трубы Антивентури» от устройства В.В. Длоугого [23] являются:

- измерение расхода гидросмеси, а не концентрации гидросмеси;
- создание перепада давлений в двух сечениях - в самом трубопроводе и в расширяющей цилиндрической части;
- отбор давления производится на самой диффузорной (расширяющей) цилиндрической части устройства, а не в конфузорной (сужающей), как в прежней конструкции [46].

Таким образом, «труба Антивентури» конструируется так, чтобы разность давлений образовывалась в двух смежных, близко отстоящих друг от друга, сечениях. Перепад давлений измеряется первичным датчиком – дифференциальным манометром различных типов с передачей сигнала на шкалу вторичного самопишущего прибора.

В качестве расходомера гидросмеси «труба Антивентури» на практике впервые использовалась специалистами Института гидромеханики и гидравлики Академии наук Украины при земснарядом способе добычи гравийно-песчаного материала [74], а затем расходомеры различных конструкций и параметров успешно проходили апробацию сотрудниками МГРИ при гидромониторно-землесосной разработке россыпных месторождений цветных полезных ископаемых на карьерах Украины (Иршинский ГОК, Верхне-Днепровский ГМК), а также России - прииск «Экспериментальный» (Магаданская область) [55]. При этом методическое обеспечение расчетных гидродинамических параметров расходомера с расширяющим устройством производилось по аналогии с расчетами трубы Вентури.

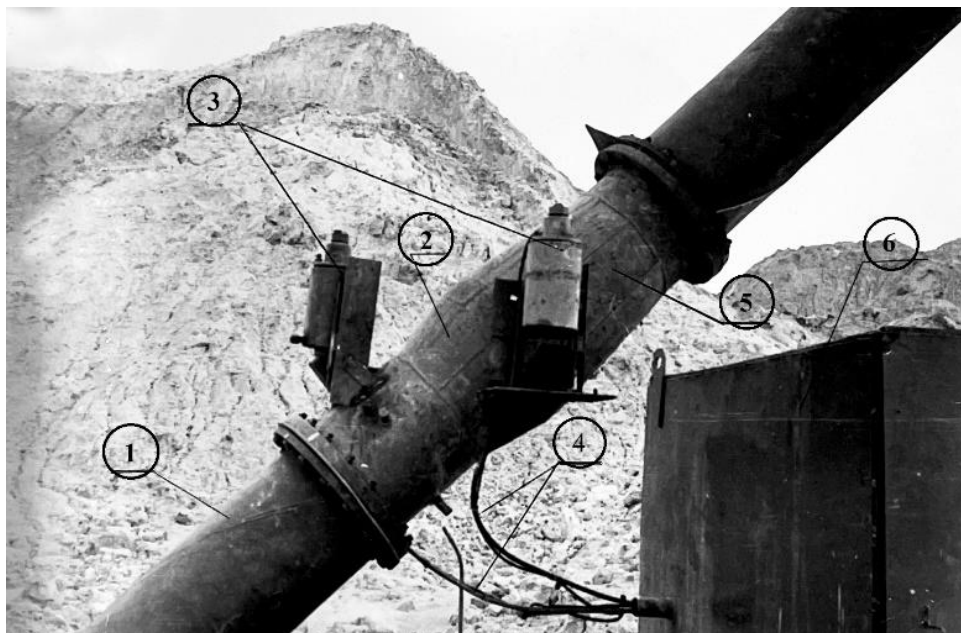
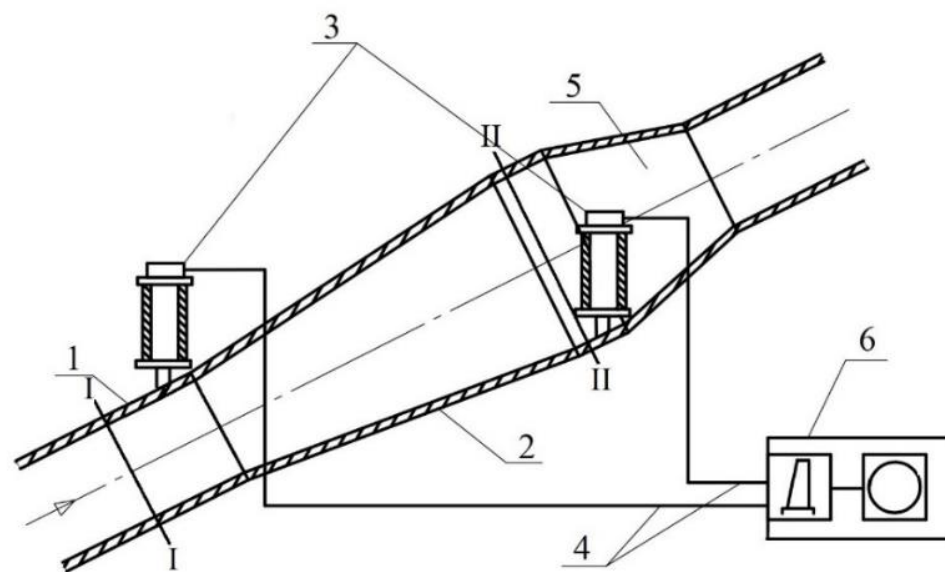


Рис. 3.2. Гидродинамический расходомер с расширяющим устройством (диффузором) («труба Антивентури») при гидротранспорте пород на карьере Иршинского ГОКа. 1 – пульповод, 2 – расширяющее устройство (диффузор); 3 – разделители с эластичными диафрагмами; 4 – импульсные трубки; 5 – сужающая часть (конфузор); 6 – шкаф для первичного датчика и вторичного регистрирующего прибора.

Теоретические основы определения расхода гидросмеси в литературе рассматриваются в основном для труб Вентури (см. раздел 2.2). Учитывая, что рассмотренные измерительные системы по принципу действия являются устройствами переменного перепада давления, для оценки и обоснования расчетного уравнения гидродинамического расходомера типа «трубы

Антивентури» нами был принят приведенный аналогичный методический подход.

Для аналитической проработки решаемой задачи ниже рассмотрим функциональные зависимости, основанные на комбинации теоретических решений по гидромеханике движения жидкости в трубопроводе в турбулентном режиме различных ученых [1, 28, 29, 36, 66, 89].

Как известно, движение жидкости происходит под действием силы тяжести, разности давления и других факторов. Через любое сечение трубопровода за равные промежутки времени t обычно протекают одинаковые объёмы V , так как жидкость практически несжимаема [1]. Поэтому через сечение с меньшей площадью жидкость течет быстрее и наоборот, т.е. действует уравнение потока, обычно называемое уравнением неразрывности, которое имеет вид:

$$S_1 \vartheta_1 = S_2 \vartheta_2 \quad (3.2)$$

или

$$S \cdot \vartheta = const, \quad (3.3)$$

где S_1 и S_2 – площади поперечного сечения входного участка трубопровода и расширенной части расходомера;

ϑ_1 и ϑ_2 – средние скорости движения жидкости в сечениях I-I и II-II (рис.3.1).

Полное давление P в любом потоке складывается из статического и динамического давлений; в стационарном потоке их сумма остаётся постоянной. Если жидкость течет в наклонном участке трубопровода, то следует учитывать связанное с наклоном изменение энергии. Известно, что энергия W – это способность тела совершать работу A . При этом она, расходуемая на изменение скорости, связанной с различным сечением трубопровода, и высоты подъема жидкости h (в наклонном участке трубопровода), равна сумме изменения потенциальной энергии $W_{\text{п}}$ и кинетической энергии $W_{\text{к}}$, т.е.

$$A = W_{\text{п}} + W_{\text{к}} \quad (3.4)$$

Если возьмем элемент объёма жидкости ΔV то, $A = F \cdot \Delta l$, где F – сила нормального давления, действующая на поверхность тела, перемещающего его на

высоту (расстояние) Δl , и вызывающая ускорение. Так как давление $p = \frac{F}{S}$, получим:

$$A = p \cdot S \cdot \Delta l = p \cdot \Delta V, \quad (3.5)$$

Учитывая, что в жидкости существует давление, обусловленное собственным весом G , то величина

$$p = \frac{G}{S} \text{ или } \frac{m \cdot g}{S} \quad (3.6)$$

Поскольку значения объемной плотности равно $\rho = \frac{m}{V}$, то имеем

$$p = \rho \cdot V \cdot g S, \quad (3.7)$$

а так как $V = S \cdot h$, получаем статическое давление, обусловленное весом жидкости, равное:

$$p = \rho \cdot h \cdot g \quad (3.8)$$

Таким образом, разность давлений в искомых сечениях расходомера:

$$(p_1 - p_2) \cdot \Delta V = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{m}{2g} (\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2) \quad (3.9)$$

Учитывая, что объем остается постоянным вследствие несжимаемости жидкости, разделив на ΔV , а также $\rho = \frac{m}{V}$, получим разность давлений, равную:

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h_2 - \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho}{2g} \vartheta_2^2 - \frac{\rho}{2g} \vartheta_1^2 \quad (3.10)$$

Таким образом, имеем уравнение Бернулли в виде

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho \cdot \alpha}{2g} \vartheta_1^2 = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{\rho \cdot \alpha}{2g} \vartheta_2^2, \quad (3.11)$$

где α – коэффициент Кориолиса, учитывающий распределение скоростей по сечению потока, при турбулентном режиме $\alpha = 1 \div 1,05$.

Таким образом, сумма статического давления P , давления, обусловленного весом столба жидкости $\rho \cdot h \cdot g$ и динамического давления $\frac{\rho \vartheta^2}{2}$, остается постоянной.

И.Е. Идельчик [28] считает, что разность высот не играет существенную роль, и если жидкость движется по трубопроводу примерно на одной высоте и $\alpha \approx 1$, то получим

$$\frac{p_1}{g} + \frac{\rho \vartheta_1^2}{2g} = \frac{p_2}{g} + \frac{\rho \vartheta_2^2}{2g} + \Delta H_{\text{общ}} \quad (3.12)$$

или

$$\Delta p = \frac{p_1 - p_2}{g} = \frac{\rho \vartheta_2^2}{2g} - \frac{\rho \vartheta_1^2}{2g} + \Delta H_{\text{общ}} = \frac{\rho}{2g} (\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2) + \Delta H_{\text{общ}}, \quad (3.13)$$

$\Delta H_{\text{общ}}$ - потерянная часть давления, идущая на преодоление общего сопротивления измерительного участка трубопровода, которое рассматривается при проведении аналитических и производственных исследований в разделе 4.3.

При этом, величину потерянного давления ΔH , идущую на преодоление общего сопротивления данного измерительного участка трубопровода, можно определить через разность полных давлений.

В уравнении (3.13) имеем две неизвестные величины ϑ_1 и ϑ_2 , поэтому для его решения используем уравнение неразрывности потока, из которого вытекает, что средние скорости потока обратно пропорциональны площадям поперечных сечений или квадрату их диаметров:

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{D^2}{d^2}, \quad (3.14)$$

откуда

$$\vartheta_2 = \frac{S_1 \vartheta_1}{S_2} = \vartheta_1 \left(\frac{D^2}{d^2} \right)^2 \quad (3.15)$$

Следовательно,

$$\Delta p = \rho \left[\frac{S_1^2}{S_2^2} \left(\frac{\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2}{2g} \right) \right] = \frac{\rho}{2g} \vartheta_1^2 \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right] + \Delta H, \quad (3.16)$$

Решая уравнение относительно ϑ_1 через диаметры измерительного участка имеем:

$$\vartheta_1 = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p}{\rho \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1}} = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p}{\rho \left(\frac{D}{d} \right)^4 - 1}} \quad (3.17)$$

Так как расход жидкости в трубопроводе равен:

$$Q = \vartheta_1 \cdot S_1 = \vartheta_1 \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.18)$$

Определяем расход жидкости, проходящей через измерительное устройство:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p}{\rho \left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}} + \Delta H \quad (3.19)$$

Все параметры, входящие в уравнение (3.19), за исключением Δp и ΔH , и зависящие от конструктивных особенностей обозначим через параметр K , равный

$$K = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g}{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}} \quad (3.20)$$

В итоге, с учетом потерь давлений ΔH , возникающих в измерительном участке, уравнение для определения производительности гидродинамического расходомера с расширяющим устройством (типа «трубы Антивентури») будет иметь вид:

$$Q = K \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} + \Delta H. \quad (3.21)$$

3.2. Аналитические исследования различных методов расчета местных гидравлических потерь давления в диффузорной части расходомера

3.2.1. Обоснование начального участка длины диффузора

В монографии И.Е. Идельчика [28] отмечается, что местные гидравлические сопротивления в расширяющейся (диффузорной) части расходомера в основном зависят от основных геометрических характеристик диффузора: угла расширения α , степени расширения $n = \frac{S_1}{S_2}$ (где S_1 и S_2 - соответственно площади сечения расширенной и суженной частей), а также длины диффузора l_d гидродинамические условия при этом могут последовательно характеризоваться следующими режимами (рис. 3.3):

- устойчивым, безотрывным течением;
- с неустановившимся, локальным срывом потока;

- полным отрывом потока, когда основная часть диффузора занята значительной зоной обратной циркуляции;
- струйным течением, при котором основной поток оторван от стенок диффузора по всему периметру [8].

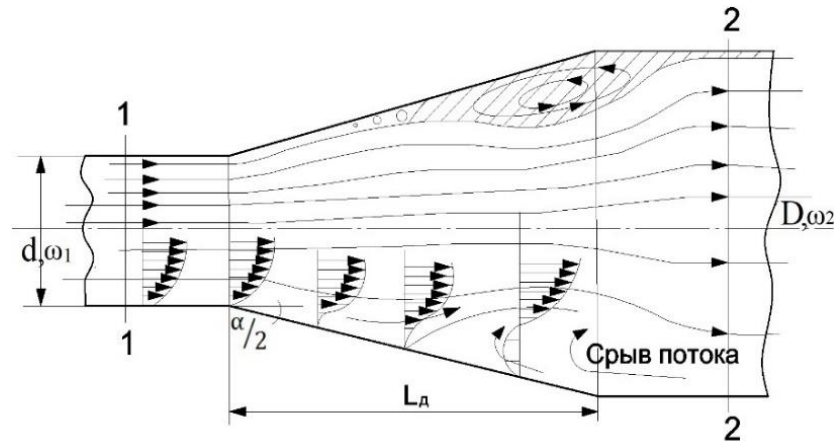


Рис. 3.3. Схематическая картина отрыва потока при наличии положительного градиента давления в диффузоре [8].

При оптимальных значениях угла расширения α при движении потока жидкости его профиль симметричен относительно оси диффузора. С увеличением значения α , вследствие вихреобразования и в дальнейшем появлении отрыва вихрей потока от стенок трубы симметрия его нарушается. В пограничном слое скорость частиц резко снижается от её значений в основном потоке до нуля у стенок. При расширении трубы, согласно уравнению Бернулли, увеличивается статическое давление за счёт скоростного. Вследствие дальнейшего понижения скорости по длине диффузора, запас кинетической энергии потока жидкости вблизи стенок становится настолько незначительным, что его оказывается недостаточно для преодоления того положительного градиента давления, который образуется по длине диффузора. Естественно, это приводит к несимметричности профиля скоростей, которая выражается в неустойчивости режима движения жидкости, увеличении её пульсаций, периодическими срывами и появлению возвратных струй. Это также связано с начальным участком длины диффузора l_d - чем больше угол расширения α , тем короче этот отрезок трубы. Взаимосвязь

основных геометрических параметров гидродинамического расходомера можно установить по следующему уравнению [28]:

$$\frac{l_d}{D_0} = \frac{n-1}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (3.23)$$

где n - степень расширения;

D_0 – диаметр расширенной части расходомера, мм;

α - угол расширения, °;

l_d - длина диффузора, м.

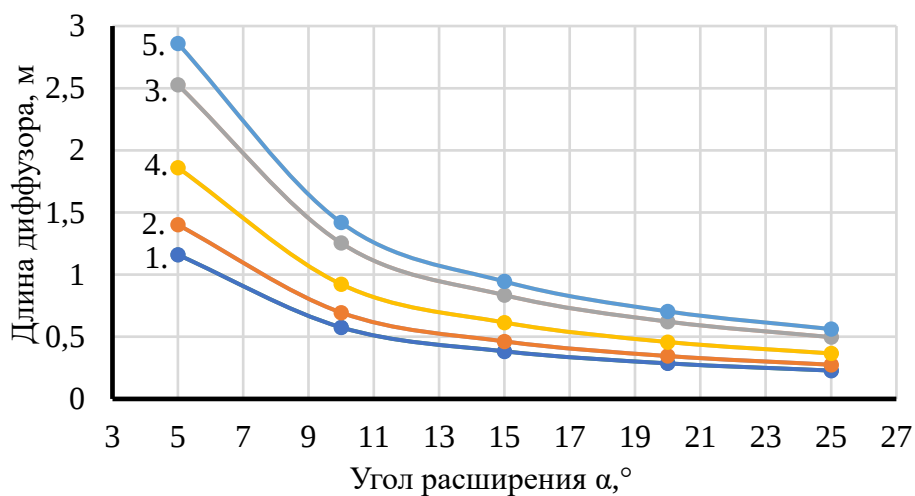


Рис.3.4. Зависимости длины диффузора от угла расширения α для различных типоразмеров расходомеров по формуле И.Е. Идельчика. 1 – $\frac{D}{d} = \frac{418}{317}$ мм ($n=1,74$); 2 – $\frac{D}{d} = \frac{473}{351}$ мм ($n = 1,82$); 3 – $\frac{D}{d} = \frac{800}{580}$ мм ($n = 1,9$); 4 – $\frac{D}{d} = \frac{510}{348}$ мм ($n = 2,15$); 5 – $\frac{D}{d} = \frac{608}{359}$ мм ($n = 2,87$). (табл.3.5).

Таблица 3.5

Значения длины диффузора l_d при различных углах расширения α и степени расширения n [28]

Параметры расходомера	Степень расширения	Расход	Длина диффузора l_d при угле расширения α , м				
			5°	10°	15°	20°	25°
D/d, мм	$n=S1/S2$	Q, м ³ /ч					
418/317	1,74	2200	1,16	0,58	0,38	0,29	0,23
473/351	1,82	2700	1,40	0,70	0,46	0,35	0,28
800/580	1,9	5800	2,53	1,25	0,84	0,62	0,50
510/348	2,15	2500	1,86	0,92	0,62	0,46	0,37
608/359	2,87	2500	2,86	1,42	0,95	0,70	0,56

С уменьшением угла расширения α длина диффузора l_d увеличивается, что сопровождается малыми потерями энергии. На практике не всегда возможно

применять длинные диффузоры с малыми углами расширения, ввиду значительных габаритных размеров, их массы, усложнения конструкции, а также монтажа и эксплуатации. В результате проведенных исследований были установлены оптимальные значения геометрических параметров: $\alpha=5\div7^\circ$ при $l_d=1,2\div1,45$ м.

3.2.2. Анализ различных методов расчета местных гидравлических сопротивлений

Потери энергии в диффузорах, кроме угла расширения и степени расширения n , также зависят от режимов течения, характеризующихся числом Рейнольдса Re , относительной шероховатостью внутренних стенок трубопровода, характером распределения скоростей перед входом в расширенную часть расходомера. Вследствие возрастания касательных напряжений повышается турбулентный обмен между частицами двухфазной смеси, что обуславливает увеличение невосполнимых потерь давления.

Другим фактором, как было отмечено выше, является формирование вихреобразования вблизи стенок и возможные срывы вихрей, образующие обратные течения. Таким образом, в диффузорной зоне расходомера, помимо обычных потерь на трение $\Delta H_{тр}$, возникают дополнительные потери давления из-за расширения поперечного сечения трубопровода $\Delta H_{расш}$. Поэтому общие потери в диффузоре ΔH_d могут быть выражены в виде суммы:

$$\Delta H_d = \Delta H_{тр} + \Delta H_{расш} \quad (3.24)$$

И. Е. Идельчик и другие учёные [1, 59, 73] предложили потери на расширение определять в долях теоретических потерь при внезапном расширении, или в долях "потерь на удар" - $\varphi_{расш}$. Этот термин аналогичен в общей механике, когда потери кинетической энергии при неупругом ударе твёрдых тел выражается потерей скоростей:

$$\Delta H_{уд} = \frac{\rho}{2} (v_1 - v_2)^2 \quad (3.25)$$

ρ - плотность жидкости, кг/м³;

где v_1 и v_2 - соответственно скорости до расширения потока и после него.

Термин можно сформулировать как «потери напора при внезапном расширении равны скоростному напору, подсчитанному для потерянной скорости» [28].

Таким образом, общие потери давления, учитывая уравнение (3.24) можно представить в виде:

$$\Delta p = \zeta_{тр} + \varphi_{расш} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \quad (3.26)$$

где $\varphi_{расш}$ - коэффициент полноты удара диффузора, равный [28]:

$$\varphi_{расш} = 3,2k(\operatorname{tg} \alpha/2)^{1,25} = 3,2k \operatorname{tg}(\alpha/2) \sqrt[4]{\operatorname{tg}(\alpha/2)} \quad (3.27)$$

где k – коэффициент равномерности движения потока;

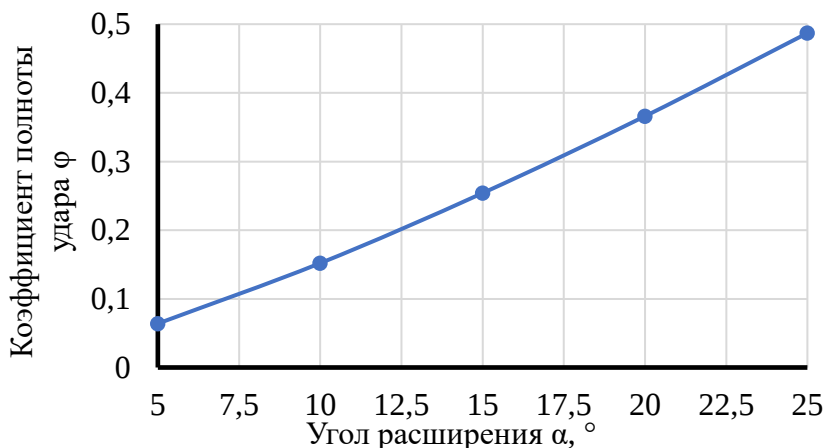


Рис.3.5. Зависимость коэффициента полноты удара φ от угла расширения диффузора [28].

Таблица 3.6

Значения коэффициента полноты удара φ от угла расширения диффузора

Угол расширения $\alpha, ^\circ$	Коэффициент полноты удара φ
5	0,064
10	0,152
15	0,254
20	0,366
25	0,487

Коэффициент потерь на трение можно определить по уравнению:

$$\zeta_{\text{тр.}} = \frac{\lambda}{8 \sin \alpha / 2} \frac{n^2 - 1}{n^2} \quad (3.28)$$

где λ — это коэффициент сопротивления трения единицы длины диффузора, определяемый в зависимости от числа Re и степени шероховатости и определяется по формуле П. К. Конакова [28]:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \lg Re - 1,52)^2} \quad (3.29)$$

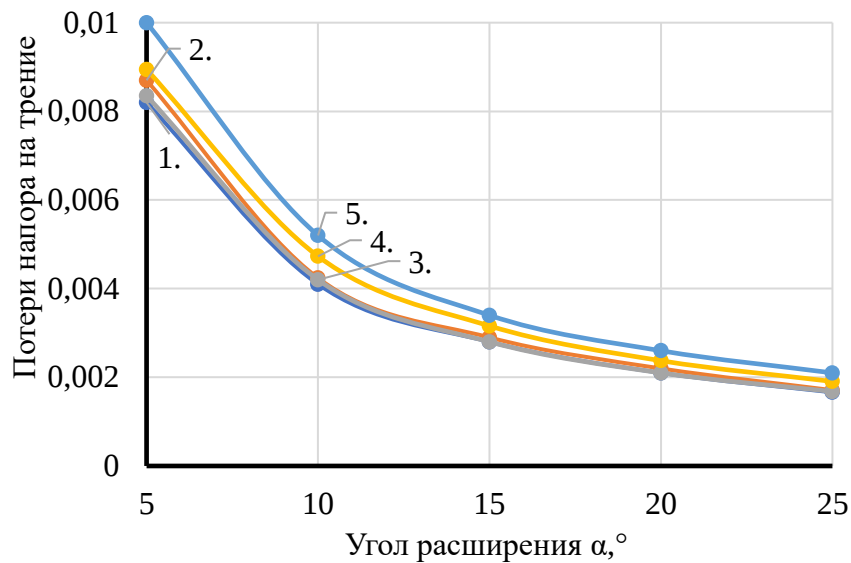


Рис. 3.6. Зависимости потерь напора на трение $\zeta_{\text{тр}}$ от угла расширения α . 1 — $\frac{D}{d} = \frac{418}{317}$ мм ($n=1,74$); 2 — $\frac{D}{d} = \frac{473}{351}$ мм ($n = 1,82$); 3 — $\frac{D}{d} = \frac{800}{580}$ мм ($n = 1,9$); 4 — $\frac{D}{d} = \frac{510}{348}$ мм ($n = 2,15$); 5 — $\frac{D}{d} = \frac{608}{359}$ мм ($n = 2,87$) (табл.3.7).

Таблица 3.7

Значения потерь напора на трение $\zeta_{\text{тр}}$ от угла расширения α [28]

Параметры расходомера	Степень расширения	Расход	Значения перепада давления Δp по формуле (3.38) при угле расширения α				
			5°	10°	15°	20°	25°
D/d, мм	n=S1/S2	Q, м ³ /ч					
418/317	1,74	2200	0,008	0,004	0,003	0,002	0,002
473/351	1,82	2700	0,008	0,004	0,003	0,002	0,002
800/580	1,9	5800	0,008	0,004	0,003	0,002	0,002
510/348	2,15	2500	0,009	0,005	0,003	0,002	0,002
608/359	2,87	2500	0,01	0,005	0,003	0,003	0,002

Как видно из графической зависимости (рис.3.5) и таблицы 3.7 значения линейных потерь напора на трение составляют тысячные доли м.вод.ст. для всех рассматриваемых величин α и n , что позволяет сделать вывод о минимальном их влиянии на измерение расхода жидкости. Тогда, учитывая значение потерь на трение получим зависимости:

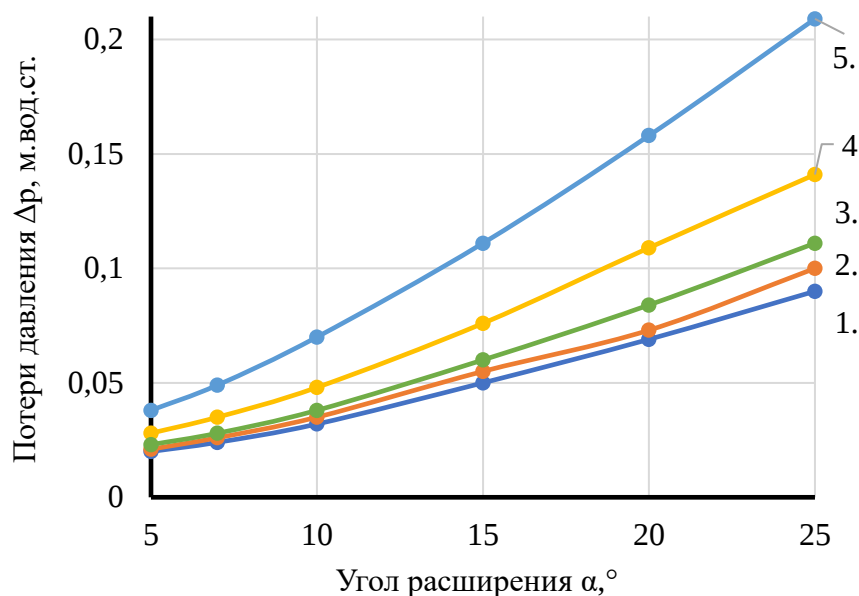


Рис. 3.7. Зависимости перепада давления Δp от угла расширения α , расхода Q , степени расширения n . 1 – $\frac{D}{d} = \frac{418}{317}$ мм ($n=1,74$); 2 – $\frac{D}{d} = \frac{473}{351}$ мм ($n = 1,82$); 3 – $\frac{D}{d} = \frac{800}{580}$ мм ($n = 1,9$); 4 – $\frac{D}{d} = \frac{510}{348}$ мм ($n = 2,15$); 5 – $\frac{D}{d} = \frac{608}{359}$ мм ($n = 2,87$) (табл.3.8).

Таблица 3.8

Значения потерь давления расширяющего устройства при различных углах расширения α и степени расширения n с учетом потерь на трение [28]

Параметры расходомера	Степень расш. $n=S1/S2$	Расход $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	Значения перепада давления Δp при угле расширения α					
			5°	7°	10°	15°	20°	25°
D/d, мм								
418/317	1,74	2200	0,02	0,024	0,032	0,05	0,069	0,09
473/351	1,82	2700	0,021	0,026	0,035	0,055	0,077	0,1
800/580	1,9	5800	0,023	0,028	0,038	0,06	0,084	0,111
510/348	2,16	2500	0,028	0,035	0,048	0,077	0,109	0,141
608/359	2,8	2500	0,038	0,049	0,07	0,112	0,158	0,209

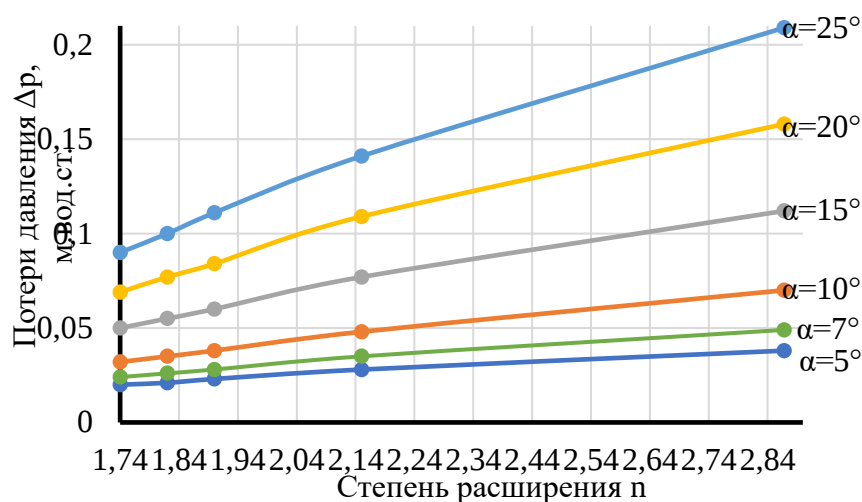


Рис. 3.8. Зависимости потерь давления Δp от степени расширения n при различных расходах жидкости [28]. 1 – $Q=2237 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($n=1,74$); 2 – $Q=2688 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($n=1,82$); 3 – $Q=5762 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($n=1,9$); 4 – $Q=2493 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($n=2,15$); 5 – $Q=2505 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($n=2,87$) (табл.3.9).

Таблица 3.9

Значения потерь давления расширяющего устройства при различных углах расширения α и степени расширения n с учетом потерь на трение [28]

Угол сходимости, °	Значения перепада давления Δp при степени расширения n		
α	1,74	1,9	2,87
5°	0,02	0,023	0,038
7°	0,024	0,028	0,049
10°	0,032	0,038	0,07
15°	0,05	0,06	0,112
20°	0,069	0,084	0,158
25°	0,09	0,111	0,209

На рис. 3.7 приведены зависимости потерь энергии (давления) от угла расширения диффузора α для различных типоразмеров расходомеров n . При этом установлено, что с увеличением угла расширения α от 5° до 25° потери энергии в виде перепада давлений Δp повышаются более чем в 6 раз, а при возрастании степени расширения n увеличиваются незначительно (рис. 3.8 и табл. 3.9), хотя сами потери имеют высокие значения.

Результаты аналитических исследований, по представленному методу расчета функциональной зависимости $\Delta p = f(n, \alpha, l_d)$ диффузора гидродинамического расходомера, позволили составить номограмму (рис. 3.9) для

определения его геометрических параметров с соотношением площадей поперечных сечений расширенной части диаметрами D и трубопровода – d , представленных ниже: $\frac{D}{d} = \frac{418}{317}$ мм ($n = 1,74$); $\frac{D}{d} = \frac{473}{351}$ мм ($n = 1,82$); $\frac{D}{d} = \frac{510}{348}$ мм ($n = 2,15$); $\frac{D}{d} = \frac{608}{359}$ мм ($n = 2,87$) с расходами гидросмеси Q при изменении их значений от 2200 м³/ч до 2700 м³/ч, а также для $\frac{D}{d} = \frac{800}{580}$ мм ($n = 1,9$) с расходом $Q \approx 5700$ м³/ч [22].

Предлагаемая номограмма позволяет определять для практических расчетов во взаимосвязи основные геометрические размеры расходомера «трубы Антивентури» - угол расширения α , степень расширения n , длину диффузора l_d , необходимые для конструирования и эксплуатации расходомеров в производственных условиях [22].

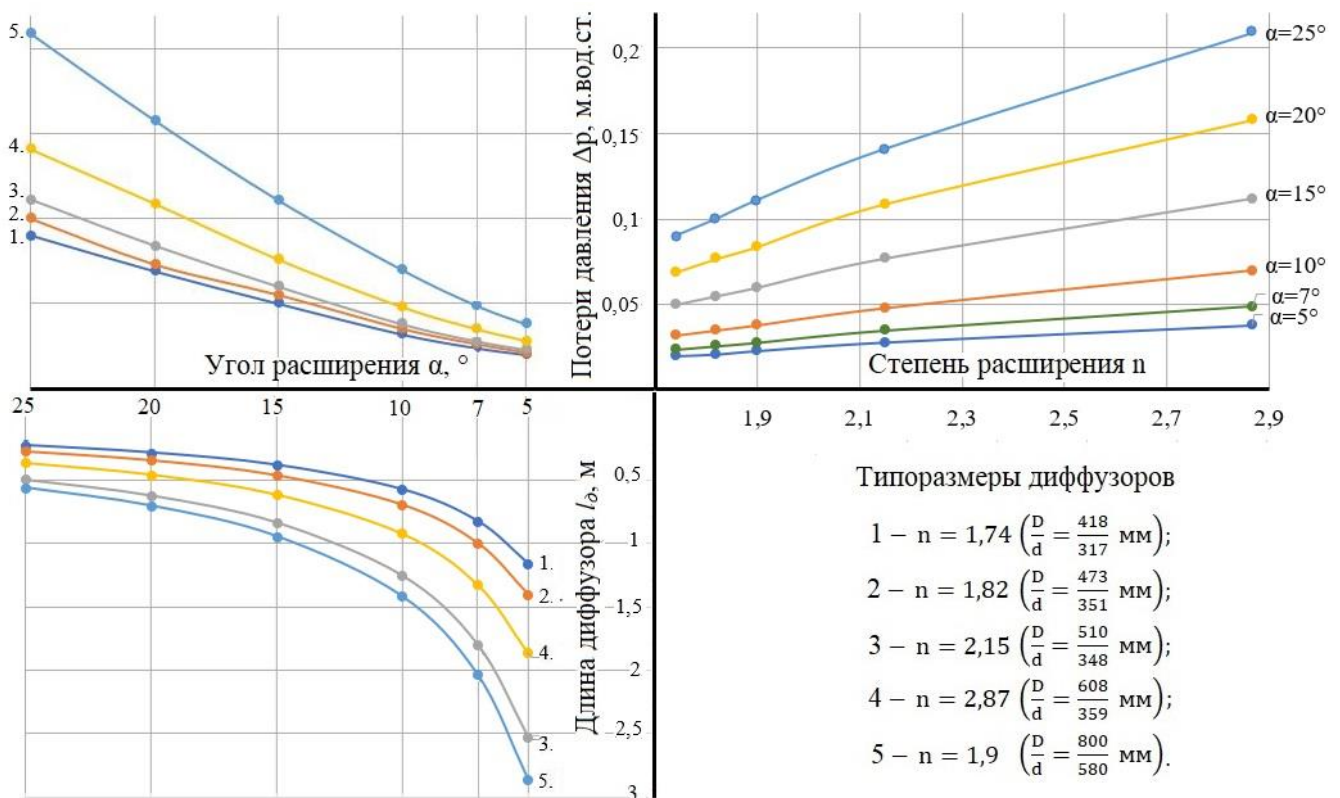


Рис. 3.9. Номограмма для определения основных параметрических величин гидродинамического расходомера переменного перепада давления типа «трубы Антивентури».

Эти данные были использованы при проектировании и эксплуатации гидродинамических расходомеров во время тестирования расходно-напорных характеристик грунтонасосов, определяющих рациональные режимы их работы, в условиях гидромеханизированной разработки месторождений вышеназванных горнодобывающих предприятий.

Помимо монографии И.Е. Идельчика [28], в работе [66] Рабинович Е.З. предлагает следующее уравнение для определения потери энергии в зависимости от угла расширения α с учетом потерь давления на трение

$$\Delta p = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2} + \left(\frac{n - 1}{n} \right)^2 \cdot \sin \alpha \quad (3.30)$$

где

n – степень расширения расходомера;

φ - коэффициент полноты удара;

α – угол расширения, °;

λ - это коэффициент сопротивления на трение единицы длины диффузора.

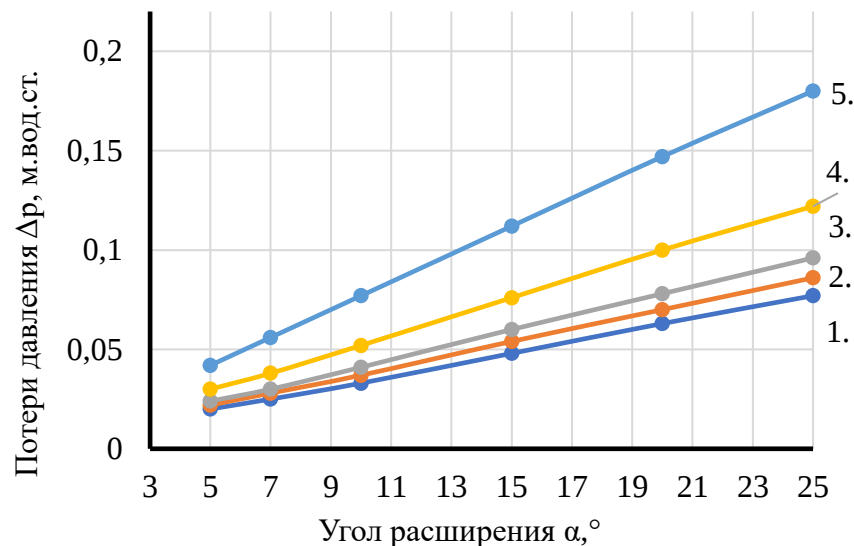


Рис. 3.10. Зависимости перепада давления Δp от угла расширения α , при степени расширения n с учетом потерь давления на трение $\zeta_{\text{тр}}$ [66]. $1 - \frac{D}{d} = \frac{418}{317}$ мм ($n=1,74$); $2 - \frac{D}{d} = \frac{473}{351}$ мм ($n = 1,82$); $3 - \frac{D}{d} = \frac{800}{580}$ мм ($n = 1,9$); $4 - \frac{D}{d} = \frac{510}{348}$ мм ($n = 2,15$); $5 - \frac{D}{d} = \frac{608}{359}$ мм ($n = 2,87$) (табл.3.10).

Таблица 3.10

Значения потерь давления расширяющего устройства при различных углах расширения α и степени расширения n с учетом потерь на трение [66]

Параметры расходомера	Степень расш.	Расход	Значения потерь давления Δp при угле расширения α					
D/d, мм	$n=S1/S2$	Q, м ³ /ч	5°	7°	10°	15°	20°	25°
418/317	1,74	2200	0,02	0,025	0,033	0,048	0,063	0,091
473/351	1,82	2700	0,022	0,028	0,037	0,054	0,07	0,102
800/580	1,9	5800	0,024	0,03	0,041	0,06	0,078	0,113
510/348	2,15	2500	0,03	0,038	0,052	0,076	0,1	0,144
608/359	2,868	2500	0,042	0,056	0,077	0,112	0,147	0,213

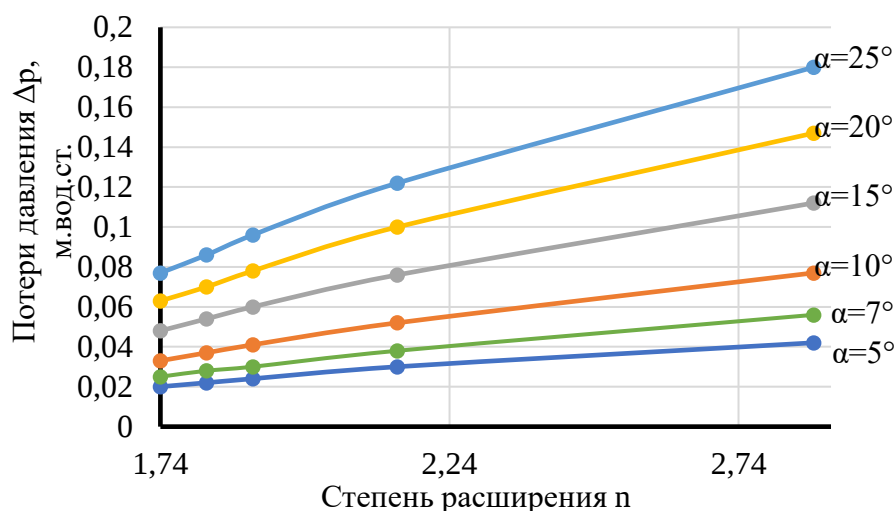


Рис.3.11. Зависимости потерь давления Δp от степени расширения n при различных углах расширения α и степени расширения n с учетом потерь на трение [66] (табл.3.11).

Таблица 3.11

Значения потерь давления расширяющего устройства при различных углах расширения α и степени расширения n с учетом потерь на трение [66]

Угол сходимости, °	Значения перепада давления Δp при степени расширения n		
α	1,74	1,9	2,87
5°	0,02	0,024	0,042
7°	0,025	0,03	0,056
10°	0,033	0,041	0,077
15°	0,048	0,06	0,112
20°	0,063	0,078	0,147
25°	0,091	0,113	0,213

Результаты расчетов функции $\Delta p = f(n, \alpha)$, вычисленные по уравнению (3.40) приведены на рис. 3.12 и в таблице 3.10. Анализ этих данных показывает, что значения Δp убывают с уменьшением угла расширения α примерно в 4 раза, а при степени расширения n менее, чем в 1,3 раза.

При углах расширения $\alpha=5^\circ$ и $\alpha=7^\circ$, минимальные потери энергии, соответственно равные 0,02-0,056 м.вод.ст. что составляют 0,79-1,69% и 1,0-2,2% максимальной шкалы измерения дифманометра, при его значениях $\Delta p_{max}=1,6$ м.вод.ст. и 2,5 м.вод.ст. С увеличением угла расширения $\alpha>7^\circ$ возрастают величины Δp (более чем на 2,5%). Поэтому оптимальными углами расширения можно считать значения, равные $5-7^\circ$ при измерении потерь давления дифманометром с максимальными значениями перепада давления $\Delta p=1,6$ м.вод.ст. и 2,5 м.вод.ст.

В работе [27] Емцев Б.Т. предлагает определять потери давления по уравнению

$$\Delta p = \varphi \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2}{2} \quad (3.31)$$

где ϑ_1, ϑ_2 – скорости потока до и после расширения, м/с;

φ – коэффициент полноты удара, рекомендовано применять по графику зависимости $\varphi = f(\alpha)$, приведенному в работе [27]:

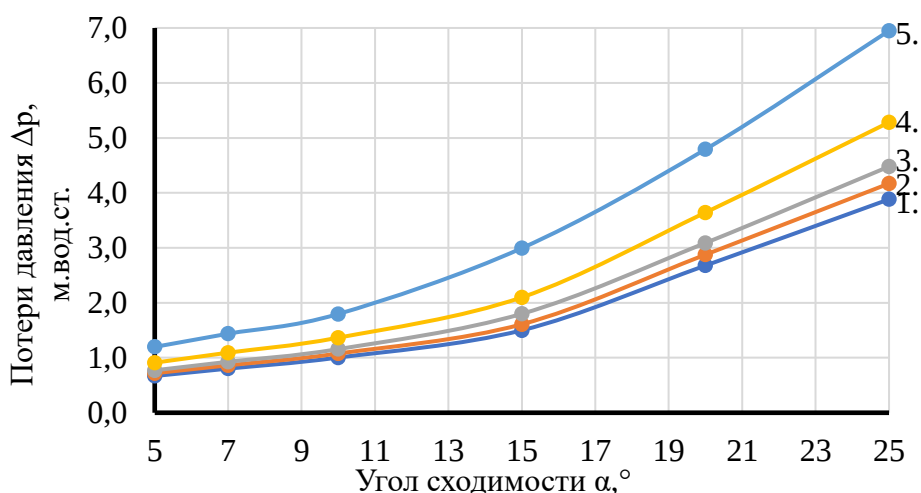


Рис.3.12. Расчетные зависимости перепада давления Δp от угла расширения α при различных значениях степени расширения n по уравнению [27]. 1 – $n=1,74$; 2 – $n=1,82$; 3 – $n=1,9$; 4 – $n=2,15$; 5 – $n=2,87$ (табл.3.12).

Таблица 3.12

Значения потерь давления расширяющего устройства при различных углах расширения α и степени расширения n [27]

Параметры расходомера	Степень расш.	Расход	Значения перепада давления Δp по формуле $\Delta p = \varphi \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2}{2}$ при угле расширения α					
			5°	7°	10°	15°	20°	25°
D/d, мм	$n = S_1/S_2$	Q, м³/ч						
418/317	1,74	2200	0,67	0,80	1,00	1,50	2,68	3,88
473/351	1,82	2700	0,72	0,86	1,08	1,61	2,88	4,17
800/580	1,9	5800	0,77	0,93	1,16	1,80	3,09	4,48
510/348	2,15	2500	0,91	1,09	1,37	2,10	3,64	5,28
608/359	2,87	2500	1,20	1,44	1,80	3,00	4,79	6,95

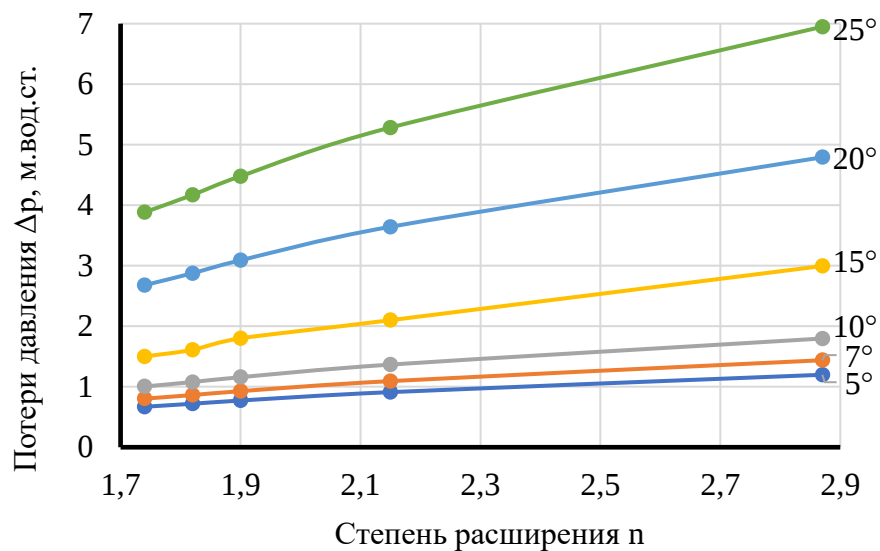


Рис.3.13. Зависимости потерь давления Δp от степени расширения n при различных расходах жидкости (по Б.Т.Емцеву) (табл.3.13).

Таблица 3.13

Значения зависимости потерь давления Δp от степени расширения n [27]

Угол сходимости, °	Значения перепада давления Δp по формуле $\Delta p = \varphi \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2}{2}$ при степени расширения n		
	1,74	1,82	2,87
α			
5°	0,67	0,77	1,20
7°	0,80	0,93	1,44
10°	1,00	1,16	1,80
15°	1,50	1,80	3,00
20°	2,68	3,09	4,79
25°	3,88	4,48	6,95

При повышении угла расширения α потери давления Δp возрастают почти в 5 раз, однако сами значения Δp , равные 0,67 и 0,8 соответственно при $\alpha=5^\circ$ и $\alpha=7^\circ$, даже при малых их величинах составляют $\sim 50\%$ максимального значения $\Delta p=1,6$ м.вод.ст. и 2,5 м.вод.ст., измеряемого дифманометром, что не является приемлемым для дальнейших расчетов. Кроме того, при увеличении степени расширения n потери давления Δp изменяются незначительно ($\sim 0,8$ раз).

Потери давления, рассчитанные по Емцеву Б.Т. [27] и другим методам расчета имеют значительные величины потерь давления, в отличие от рассмотренных, так как занимают большую часть диапазона перепада давления объема применяемых дифманометров с максимальными значениями $\Delta p=1,6$ м.вод.ст. и 2,5 м.вод.ст.

Однако все они, несмотря на повышенные значения Δp , имеют тенденцию снижения потерь энергии при уменьшении углов расширения, равных $\sim 5-7^\circ$, которые можно принять как оптимальные для диффузорной части расходомера.

Характер изменения потерь давления (энергии), как уже отмечалось выше, связан с изменением структуры течения в расширяющем устройстве (диффузоре) при разных значениях α . При малых - движение жидкости безотрывное и происходит плавное расширение потока, затем с увеличением α поток начинает отрываться от одной из стенок с образованием вихревой области (рис.3.3), которая в дальнейшем с повышением угла может распространяться на всю длину расходомера.

Результаты расчетов, выполненных для $\alpha=7^\circ$, по другим методикам [1, 27], показывают, что полученные значения величины потерь давления значительно (в несколько раз) отличаются от рассмотренных выше (Идельчик И.Е. [28] и Рабинович Е.З. [66]) и поэтому не могут рассматриваться для практических расчетов местных сопротивлений расходомера, так как составляют свыше 5% от максимальных значений перепада давления измеряемого дифманометра при допустимых отклонениях $\sim 2,5\%$.

Из изложенных аналитических методов определения потерь давления диффузора расходомера можно заключить, что полученные значения Δp неоднозначны. Это, вероятно, объясняется тем, что коэффициенты местных сопротивлений в основном установлены из опытов с трубами малых диаметров и относительно небольших скоростей.

Однако, при гидротранспортировании твердых материалов в большинстве случаев характерны большие числа Рейнольдса Re , при которых создается турбулентный режим движения, когда силы инерции, возникающие при движении потока, преобладают над силами вязкости. При этом доля сил инерции особенно возрастает при движении жидкости при изменении сечения транспортного трубопровода, а также через фасонные части или обтекание различных препятствий и конфигураций [28].

В данной главе нами был проведён анализ уравнений для определения потерь давления Δp от угла расширения диффузора α при различных значениях степени расширения n , приводимых в различных литературных источниках. Условно их можно разделить на две группы. В первую могут быть определены уравнения, учитывающие степень расширения, а во вторую - скорости движения потока в суженной и расширенной частях. В результате исследований было выявлено, что при расчётах с учётом скоростей движения значения потерь давления значительно выше, чем при введении степени расширения.

Можно сделать вывод, что в уравнениях для определения минимальных потерь энергии от максимальной шкалы измерения дифманометром предпочтительнее использовать степень расширения диффузора.

Таким образом, следующим этапом ставится задача на основе опытно-промышленных исследований проанализировать полученные расчетные значения потерь энергии (давления) по вышеприведенным уравнениям, уточнить область их применения и при необходимости ввести соответствующие коррективы.

Таблица 3.14

Расчетные значения потерь давления для угла расширения $\alpha=7^\circ$ по методам различных авторов

№ п/п	Автор	Уравнение	Потери давления для угла расширения $\alpha=7^\circ$ по различным методам, м.вод.ст.				
			Параметры расходомеров D/d, мм				
			418/317 n=1,74	473/351 n=1,82	800/580 n=1,9	510/348 n=2,15	608/359 n=2,87
1.	Идельчик И.Е. [28]	$\Delta p = \varphi \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2$	0,018	0,02	0,022	0,028	0,041
2.	Идельчик И.Е. [28]	$p = \zeta_{\text{тр}} + \varphi \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2$	0,024	0,026	0,028	0,035	0,049
3.	Рабинович Е.З. [66]	$p = \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 \cdot \sin \alpha$	0,022	0,025	0,027	0,035	0,052
4.	Рабинович Е.З. [66]	$p = \zeta_{\text{тр}} + \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 \cdot \sin \alpha$	0,025	0,028	0,03	0,038	0,056
5.	Альтшуль А.Д. [1]	$\Delta p = k \cdot (n-1)^2$	0,067	0,081	0,099	0,161	0,425
6.	Альтшуль А.Д. [1]	$\Delta p = k \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2}{2}$	0,816	0,876	0,941	1,085	1,46
7.	Емцев Б.Т. [26]	$\Delta p = \varphi \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2}{2g}$	0,80	0,86	0,93	1,09	1,44
8.	Вейсбах Ю. [36]	$\Delta p = \sin \alpha \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2}{2}$	0,15	0,18	0,21	0,32	0,62

Условные обозначения к табл.3.14

d – диаметр трубопровода, мм;

D – диаметр расширенной части расходомера, мм;

n – степень расширения;

α – угол расширения, ° (3.27, 3.28, 3.30);

$\varphi_{\text{расш}}$ – коэффициент полноты удара диффузора, равный (3.27) [28]:

$$\varphi_{\text{расш}} = 3,2k(\text{tg } \alpha/2)^{1,25} = 3,2k \text{tg}(\alpha/2) \sqrt[4]{\text{tg}(\alpha/2)}$$

k – коэффициент равномерности движения потока (3.27):

$$k = \sin \alpha$$

φ – коэффициент полноты удара диффузора (3.37, 3.41) [27]:

$\alpha, ^\circ$	5	7	10	15	20	25
φ	0,1	0,16	0,18	0,24	0,4	0,53

$\zeta_{\text{тр.}}$ – коэффициент потерь на трение [28, 66] (3.28):

$$\zeta_{\text{тр.}} = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \frac{n^2 - 1}{n^2}$$

λ — коэффициент сопротивления трения единицы длины диффузора, определяемый в зависимости от числа Re и степени шероховатости стенок и определяется по формуле П. К. Конакова[28]:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \lg \text{Re} - 1,52)^2}$$

Re – число Рейнольдса:

$$\text{Re}_n = \frac{\vartheta \delta}{\nu}$$

δ – толщина слоя, мм;

ν — кинематическая вязкость среды, м²/с;

ϑ_1, ϑ_2 – скорости потока до и после расширения, м/с (3.31).

Выводы по главе 3.

1. В результате аналитических исследований установлено, что целесообразно применять расходомер с расширяющимся устройством типа «трубы Антивентури», который отличается простотой, надежностью эксплуатации, отсутствием тарировочных поверок, возможностью изготовления нестандартного оборудования в условиях даже отдаленных месторождений, а также пониженным абразивным износом расширяющей (калибровочной) части твердыми частицами гидросмеси.

2. Аналитически установлено уравнение производительности гидродинамического расходомера с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури» по гидросмеси.

3. Аналитическим путем установлены зависимости длины диффузора от угла расширения α для различных типоразмеров расходомеров со степенями расширения от 1,74 до 2,87; определено, что с уменьшением угла расширения длина диффузора увеличивается. Однако, на практике не всегда возможно применять длинные диффузоры с малыми углами расширения, ввиду значительных габаритных размеров, их массы, усложнением конструкции, а также монтажа и эксплуатации, поэтому оптимальным принимается угол расширения $\alpha=5-7^\circ$ при длине диффузора $l_d=1,2 \div 1,45$ м. Это позволяет снизить потери давления для расходомера «труба Антивентури» типоразмера $\frac{D}{d} = \frac{510}{348}$ мм с углом расширения 7° и степенью расширения $n = 2,15$, до величин, не превышающих 2% от максимальных значений перепада давлений дифманометра ДМ-3537.

4. Установлено, что потери энергии, рассчитанные по методам Идельчика И.Е., Рабиновича Е.З., Емцева Б.Т., имеют завышенные значения (более 40%) по сравнению с установленными при промышленных испытаниях на пульповоде с внутренним диаметром 410 мм.

5. Результаты аналитических исследований, по представленному методу расчета функциональной зависимости потерь давления от угла α и

степени расширения n диффузора гидродинамического расходомера, позволили составить номограмму для определения основных геометрических параметров, необходимых для конструирования и эксплуатации расходомеров в условиях гидромеханизированной разработки месторождения полезных ископаемых.

ГЛАВА 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТАРИРОВОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСХОДОМЕРА ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

4.1. Технологические аспекты опытно-промышленных исследований

Основным базовым предприятием для проведения опытно-промышленных испытаний являлся карьер экскаваторно-гидравлических работ при разработке аллювиальной террасовой ильменитосодержащей россыпи Иршинского горно-обогатительного комбината. Вскрышные породы были представлены толщей глинисто-песчаных пород (в основном мелко- и среднезернистыми кварцевыми песками) мощностью 9-12 м. Продуктивный пласт мощностью ~5 м представлял собой разномерные кварцевые пески, включающие каолины.

Разработка россыпи велась экскаваторно-гидравлическим способом. Вскрышные работы производились экскаватором ЭШ-10/60 с укладкой пустых пород в выработанное пространство [53].

Продуктивные пески разрабатывали и подавали экскаватором ЭШ-5/45 к решетке металлического зумпфа забойного грунтонасоса ГрТ-1600/50 (б. 12ГР-8Т) для размыва двумя гидромониторными установками ГМД-250 с дистанционным управлением (рис. 4.1, 4.2).

Гидротранспортирование осуществлялось с помощью перекачных грунтонасосных установок ГрТ-1600/50 по трубопроводу с внутренним диаметром 400 мм на обогатительную фабрику с расстоянием транспортирования от 1500 до 2800 м (по мере удаления фронта горных работ). Напорная вода к гидромониторам по трубопроводу с внутренним диаметром 450 мм подавалась двумя насосами 300Д-390 и дополнительным насосом 350Д-90. Во время испытаний в карьере работали три грунтонасосные установки: первая в работе, вторая в резерве и третья в ремонте или монтаже.

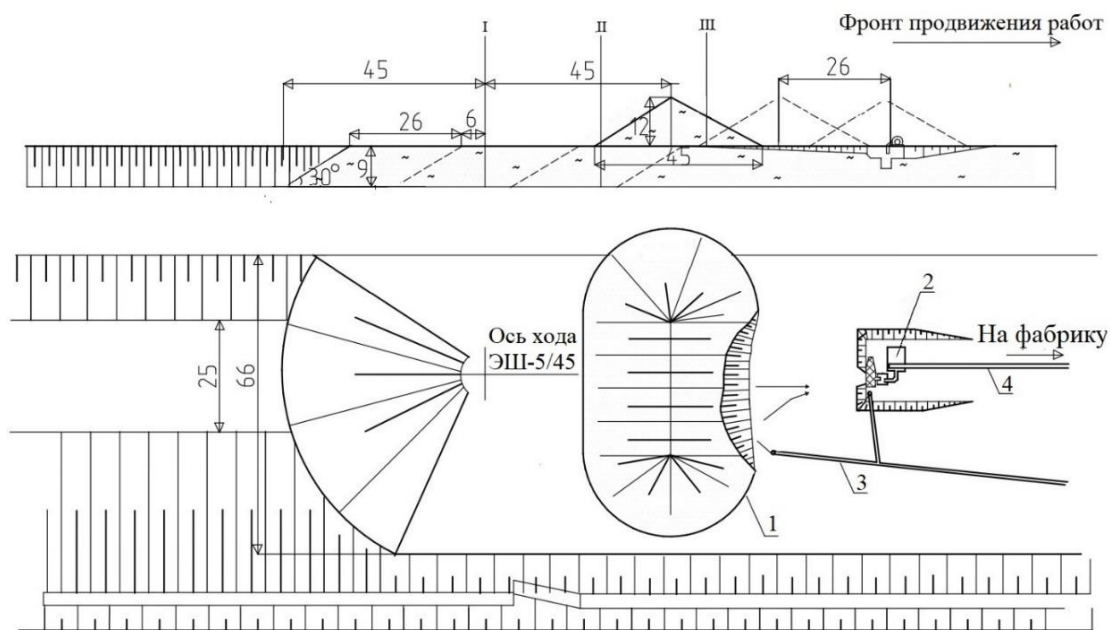


Рис. 4.1. Технология экскаваторно-гидравлических добычных работ на карьере Иршинского горно-обогатительного комбината. 1 – навал пород; 2 – грунтонасосная установка ГрТ-1600/50; 3 – водовод; 4 – пульповод.



Рис.4.2. Экскаваторно-гидравлические работы на карьере ИГОКа. Общий вид. 1 – экскаватор ЭШ-10/60 на вскрышие; 2 – экскаватор ЭШ-5/45 на добыче; 3 – размыв навала песков гидромонитором ГМД-250; 4 – измерительный блок (расходомеры, плотномеры).

В результате применения на данном месторождении указанной технологии были достигнуты высокие технико-экономические показатели.

Нестандартные устройства приборов переменного перепада давления - расходомеров и плотномеров, были изготовлены по заказу Московского геологоразведочного института в мастерских Института гидромеханики и гидравлики Академии Наук Украины, имеющих опыт их эксплуатации при земснарядной добыче песчано-гравийных пород.

После их апробации на ИГОКе в последующие годы сотрудниками МГРИ были проведены детальные тарировочные исследования измеряемых параметров гидротранспортирования пород, в различных производственных условиях, а также по гранулометрическому и вещественному составам.

Так, на Верхне-Днепровском горно-металлургическом комбинате, на карьерах которого разрабатывали редкометалльные россыпи (ильменит, рутил, циркон и другие металлы) с предварительным рыхлением горной массы разнотипным экскаваторным оборудованием, в т.ч. шагающим экскаватором ЭШ-10/60. Схема вскрышных работ также включала использование роторных комплексов ЭР-1250 с конвейерным транспортом, добычных - цепных многочерпаковых экскаваторов ЕР-710 с внутрикарьерным конвейерным транспортом и внешним - гидравлическим. Подача песков в навал на участок пульпоприготовления осуществлялась отвалообразователем ОШ-105/1600, который являлся конечным пунктом забойной цепочки "добычной экскаватор - конвейерный транспорт - перегружатель - отвалообразователь". Размыв навала песков производился гидромонитором ГМД-400 с дистанционным управлением. Гидротранспортирование от него грунтонасосами ГрТ-4000/71 производительностью 2,5 млн. м³ в год осуществлялось на обогатительную фабрику на расстояние ~5 км с геодезическими отметками +54 м [55].

Кроме того, проводилась апробация гидродинамического расходомера с расширяющим устройством на прииске "Экспериментальный" Сусуманского горно-обогатительного комбината. Россыпь была сложена рыхлыми отложениями неоднородного гранулометрического состава. Мощность

торфов - гравийно-галечных отложений составляла 3-5 м. Мощность продуктивного пласта составляла 0,8-1,6 м.

Добычные работы проводились бульдозерно-гидравлическими комплексами, выемка и транспортирование песков до загрузочного бункера велись бульдозерами различных типов, а размыв, дезинтеграцию и подъём пульпы на обогатительное устройство осуществлялись средствами гидромеханизации (гидроэлеваторы, грунтонасосы типа ГрАУ-1600/25, землесосы ЗГМ-2М). Промывка песков велась на шлюзах глубокого наполнения (ПГШ-II-250) [58].

Таким образом, опытно-промышленные испытания расходомеров проводились в разных горнотехнических условиях, с разнотипным вещественным и гранулометрическим составом.

4.2. Методическое и инструментальное обеспечение опытно-промышленных исследований

Методическое и измерительное сопровождение опытно-промышленных испытаний включало разнообразную техническую и контрольно-измерительную аппаратуру.

Нестандартные устройства, генерирующие переменный перепад давления в двух сечениях, включали:

- сужающие – бескамерную и камерную диафрагмы ДК-25-450 для определения расходов воды;
- трубу Вентури - для расхода гидросмеси до эксплуатации и после 650 часов её работы;
- расширяющее устройство типа «трубы Антивентури», различных геометрических параметров поперечных сечений (табл. 4.1). Ширина цилиндрической части 100 мм, угол расширения $\alpha=6^\circ$, длина диффузора 400 мм.

Таблица 4.1

Расходомеры с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури»,
испытанные на предприятиях

Предприятие	Технологические и геометрические параметры расходомеров				
	D/d, мм	n=S ₁ /S ₂	Расход Q, м ³ /ч	Дифманометр	
				Тип	Δр, м.вод.ст.
ИГОК	510/348	2,15	2500	ДМ-3537	2,5
ИГОК, 1978 г.	510/332	2,36	2217	ДМ-3537	2,5
ВДГМК, 1979 г.	800/580	1,9	5700	ДМ-3583М	1,6
Прииск «Экспериментальный»	510/348	2,15	2500	ДМ-3537	2,5
Северо-Восток, 1980 г.	610/395	2,38	2500	ДМ-3537	1,6

Условные обозначения к табл. 4.1:

d – диаметр трубопровода, мм;

D – диаметр расширенной части расходомера, мм;

n – степень расширения;

S₁, S₂ - соответственно площади узкой и широкой части трубопровода, м²;

Q – расход гидросмеси, м³/ч;

Δр – величина перепада давления, м.вод.ст.

Для измерения расхода воды использовалась камерная диафрагма ДК-25-450 с диаметром отверстия 278,73 мм производительностью 2015 м³/ч при максимальном перепаде давления 10 м.вод.ст. Она включала две кольцевые камеры, диск и прокладки. Отбор разности давления осуществлялся через отверстия в полостях кольцевых камер, куда вваривались импульсные трубки, а полости кольцевых камер соединялись с трубопроводом через шесть пазов, расположенных по образующей камер.

Разделители выполняли функции регулирующих устройств, устанавливались в точках отбора давлений расходомера и предохраняли от

попадания твёрдых частиц в измерительную систему. В отличие от сильфонных, мембранных и других видов, применялись эластичные грушевидной формы камеры, которые показали надёжность и мало влияли на точность измерений.

Они служили для разделения пульпы и жидкости, заполняющей внутренние полости, импульсные трубки, плюсовые и минусовые камеры дифманометров, что исключало попадание твердых частиц в гидросистему и забивку импульсных линий. В тёплый период вся гидравлическая система заливалась водой, а в холодный - незамерзающей жидкостью, которая являлась смесью 60% этиленгликоля и 40% спирта.

Импульсные металлические трубки имели диаметр 12 мм с соединениями конического типа. Они являлись соединительным звеном между разделителями и дифманометрами и служили для передачи давления из точек отбора расходомеров.

Принцип работы измерительной системы определения расхода воды заключался в следующем: при работе насосных установок в полостях кольцевых камер диафрагмы, образующих перепад давлений, различный по своей величине, значения через разделители и импульсные трубки, залитые рабочей жидкостью, передавались в дифманометр ДМ-3537 и далее на самопишущий прибор с интегратором КСД-2 (рис. 4.3).

Устройство учета фактического времени работы всего гидрокомплекса, включая насосы для воды и грунтонасосы, было основано на измерении давления в трубопроводах при их работе и отключении. Конструкция состояла из реле контроля давления и счетчика фактического времени работы гидрокомплекса с двигателем ДСДЗ-III-220В, соединённого червячной парой с цифровым барабанным интегратором БЕ-1Р-6. Реле контроля давления типа РД-2 посредством тройника было встроено в плюсовую импульсную трубку

дифференциального манометра ДМ-3537 измерения гидросмеси и последовательно включено в электрическую цепь счётчика времени.

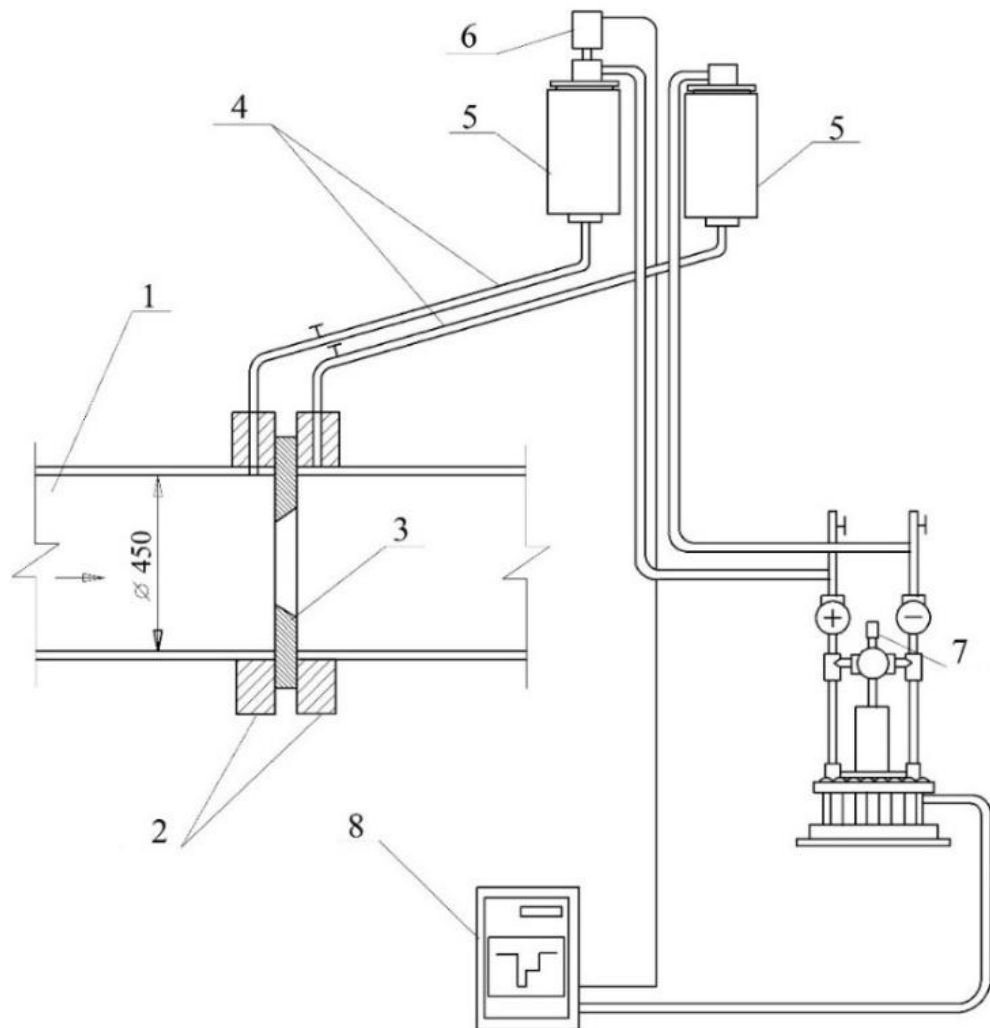


Рис.4.3. Система учета расхода воды, поступающей в карьер. 1 – водовод с внутренним диаметром 450 мм; 2 – фланцы; 3 – диафрагма ДК-25-450; 4 – импульсные трубки, диаметром 12 мм; 5 – разделители (регулирующие устройства); 6 – реле давления; 7 – дифманометр ДМ-3537; 8 – самопишущий прибор с интегратором КСД-2-054.

Стандартные первичные унифицированные дифференциальные манометры типа ДМ, технические характеристики которого приводятся в табл. 4.2, с классом точности 1,5%, выпускающиеся Московским заводом «Манометр», фиксировали перепад давления, образованный различными нестандартными устройствами в электрический сигнал переменного тока, а затем передавали его на вторичный самопишущий электронный прибор типа КСД-2 (табл. 4.3) с дифференциально-трансформаторной схемой со

встроенным интегратором, суммирующим производительность установки за определённый промежуток времени.

Таблица 4.2

Технические характеристики дифманометра типа ДМ модели 3537

Предельный номинальный перепад давлений, м.вод.ст.	Значения
- при измерении расхода	2,5
- при измерении плотности	2,5
Предельные статические давления, м.вод.ст.	До 0,25
Основная допускаемая погрешность показаний комплекса, %	$\pm 1,5$
Масса дифманометра, кг	22

Таблица 4.3

Технические характеристики самопишущего прибора КСД-2

Предел измерения, м ³ /ч	2500
Основная погрешность показаний и записи приборов при температуре окружающего воздуха $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности 30-80%, %	± 1
Скорость движения ленточной диаграммы, мм/ч	120
Погрешность скорости продвижения ленточной диаграммной ленты, %	0,5
Мощность, потребляемая прибором, Ва	35
Масса, кг	17

Объемная плотность гидросмеси определялась гидростатическим плотномером, принцип действия которого заключался в измерении перепада давления, вызванного весом твердой фазы, находящейся в восходящем или нисходящем потоке пульпы. Он включал в себя: шаровой датчик конструкции К. В. Диминского [51], установленный на пульповоде перед наклонным ставом (рис. 4.4); два разделителя с эластичными диафрагмами; дифманометр ДМ-3537 и вторичный самопишущий прибор КСД-2-054.

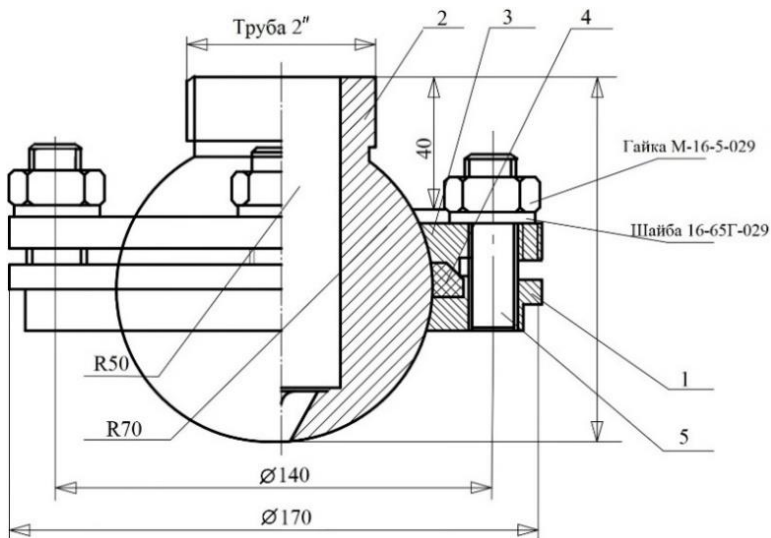


Рис.4.4. Шаровой датчик конструкции К. В. Диминского. 1 – посадочное место датчика; 2 – шар; 3 – фланец прижимной; 4 – сальниковое уплотнение; 5 – шпилька М16.

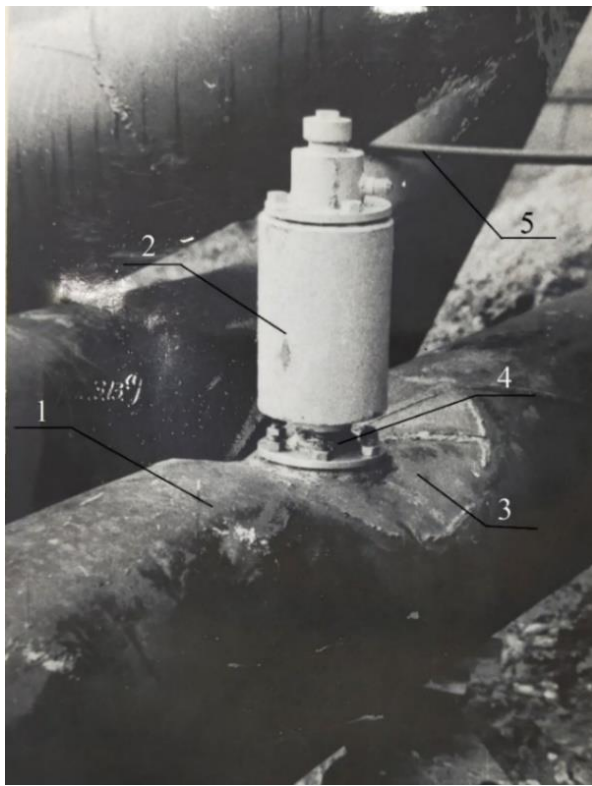


Рис.4.5. Шаровой датчик и разделитель с эластичной диафрагмой плотномера (ИГОК). 1 – пульповод Ду=400 мм; 2 – разделитель; 3 – посадочное место; 4 – шар; 5 – импульсные трубки.



Рис.4.6. «Посадочное» место шарового датчика.

Шаровой датчик предназначен для компенсации перепада давления, вызванного потерями напора по длине трубопровода при движении чистой воды. Для снижения износа шара при обтекании его потоком гидросмеси, он изготавливался из износостойкой стали 65Г или У10А с термообработкой до максимально возможной твёрдости. Компенсация перепада давления достигалась при установке шарового датчика отверстием за потоком и наклоне его на такой угол, при котором перепад давления от понижения давления при обтекании потоком отверстия шара был бы равен перепаду давления от потерь напора по длине трубопровода [25].

Такое его положение при движении по трубопроводу воды, обеспечивало перепад давления, фиксируемый первичным датчиком, равный нулю. Поэтому, при транспортировании по трубопроводу гидросмеси перепад давления вызывался только весом твёрдых частиц, содержащихся в гидросмеси. Работа гидростатического плотномера осуществлялась следующим образом: избыточное давление через шаровой датчик и разделители с эластичными мембранами передавалось в камеры дифманометра, а возникающий электрический сигнал передавался во вторичный самопишущий прибор.

Труба Вентури (рис. 4.7) представляла собой сужающие нестандартное устройство, состоящее из входного участка, внутренний диаметр которого равен диаметру трубопровода, конфузора - усеченного конуса с центральным углом сходимости $\alpha_{сх}$, суженной цилиндрической части (горловины), внутренний диаметр которой меньше диаметра входной части, диффузора - усеченного конуса, соединенного с выходным участком, диаметр которого равен диаметру трубопровода $D=410$ мм. Максимальный расход гидросмеси составлял $2054 \text{ м}^3/\text{ч}$ при перепаде давления $\Delta p_{\max}=2,5$ м.вод.ст.

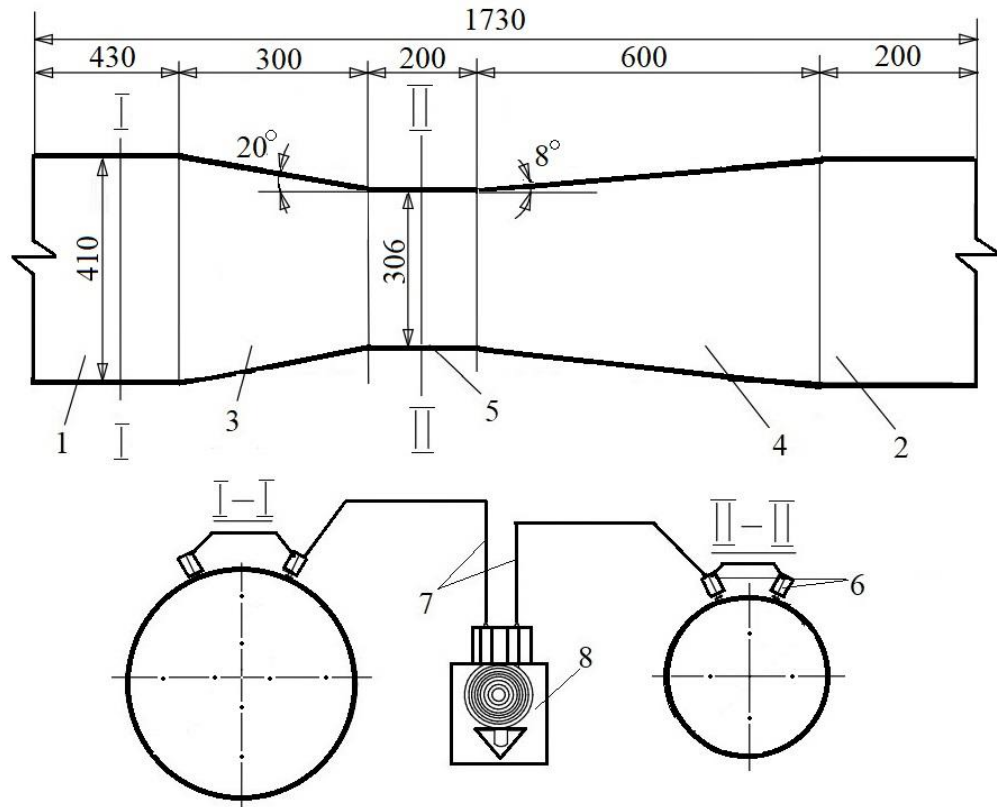


Рис.4.7. Конструктивные размеры трубы Вентури. 1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок; 3 – конфузор; 4 – диффузор; 5 – вставка; 6 – разделители; 7 – импульсные трубки; 8 – дифманометр.

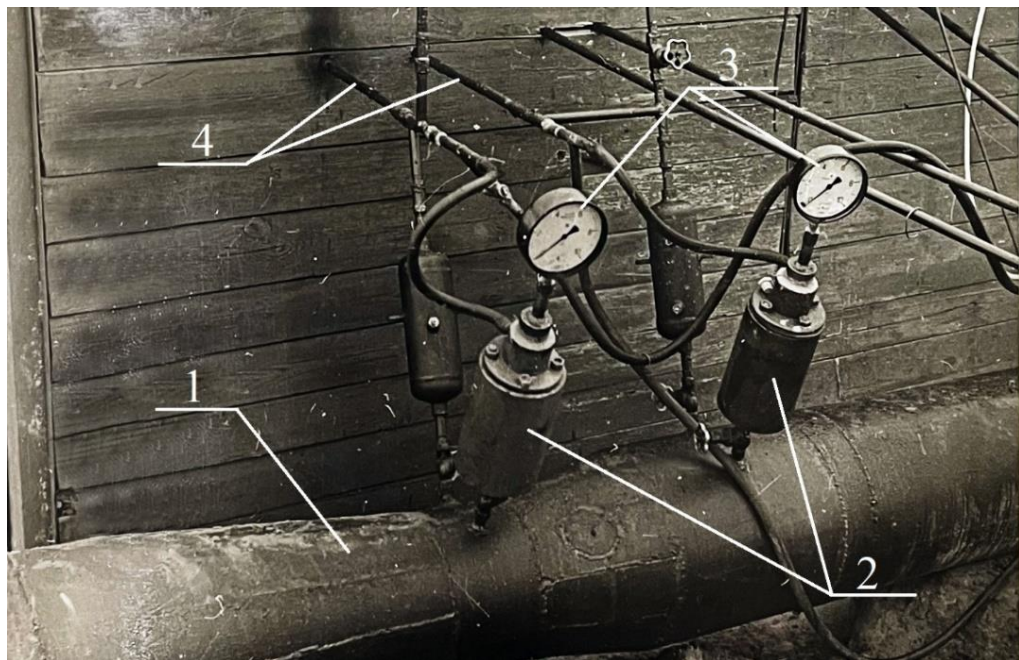


Рис.4.8. Измерение расхода гидросмеси трубой Вентури на пульповоде Ду=410 мм (ИГОК). 1 – труба Вентури; 2 – разделители; 3 – манометры; 4 – импульсные трубки.

Измерение расхода грунтонасосной установки по гидросмеси также производилось гидродинамическим расходомером с расширяющим приёмным устройством типа «трубы Антивентури», включающего входной участок с внутренним диаметром 410 мм, диффузор - усечённый конус с центральным углом расширения 6° , конфузор - усечённый конус с центральным углом сужения 12° , выходной участок и два фланца (рис.4.9). На входном участке были расположены два разделителя с эластичной диафрагмой, соединённые импульсными трубками с первичным датчиком типа ДМ-3537. Последний, с помощью кабеля длиной 80 м, передавал информацию на вторичный показывающий прибор типа КСД-2, установленный в кабине гидромониторщика.

Между диффузором и конфузором располагалась цилиндрическая часть длиной 100 мм и внутренним диаметром 510 мм. Входной участок наплавлен сормайтом до диаметра 348 мм.

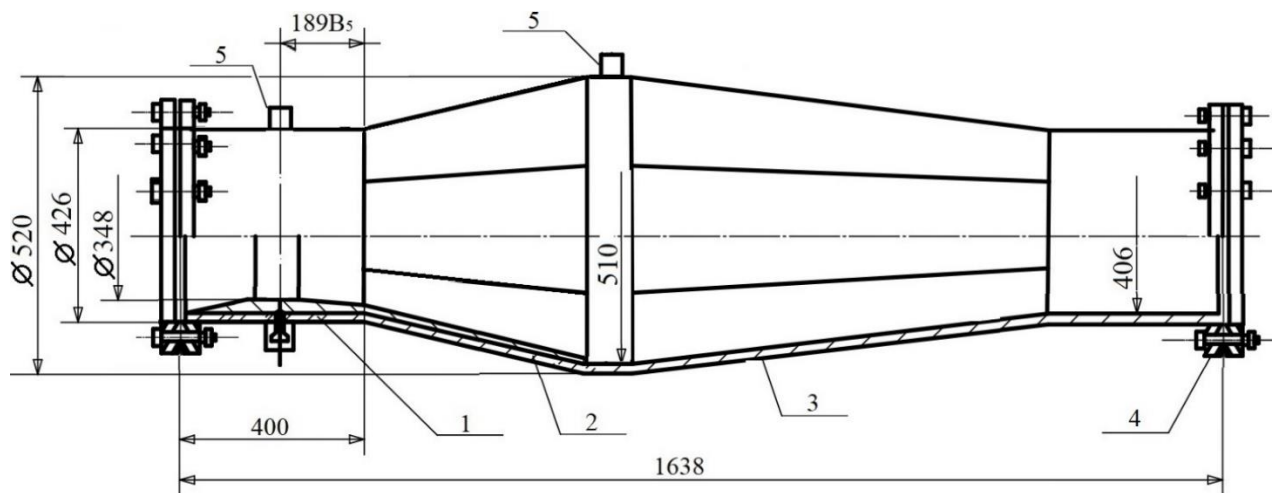
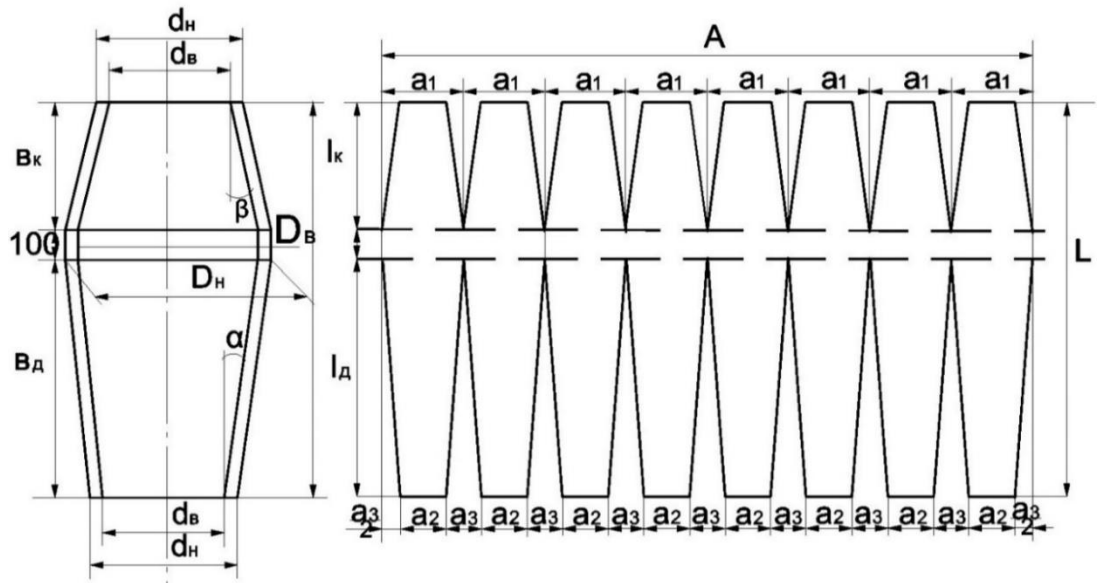


Рис.4.9. Гидродинамический расходомер с расширяющим устройством (труба «Антивентури»). 1 – отрезок трубопровода, наплавленный сормайтом; 2 – расширяющая (диффузорная) часть расходомера, 3 – конфузор; 4 – фланцы; 5 – оторники давления.



Исходные данные:

$$Q_{\max} = 2500 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$D_H = 0,530 \text{ м}$$

$$D_B = 0,510 \text{ м}$$

$$D_B^2 = 0,2601 \text{ м}^2$$

$$D_B^4 = 0,06765 \text{ м}^2$$

$$d_H = 426 \text{ мм}$$

$$d_B = 406 \text{ мм}$$

$$d = 348 \text{ мм (с наплавкой)}$$

$$\alpha = 6^\circ$$

$$\beta = 12^\circ$$

Рис.4.10. Гидродинамический расходомер «труба Антивентури» (эскиз для его изготовления) на Иршинском ГОКе.

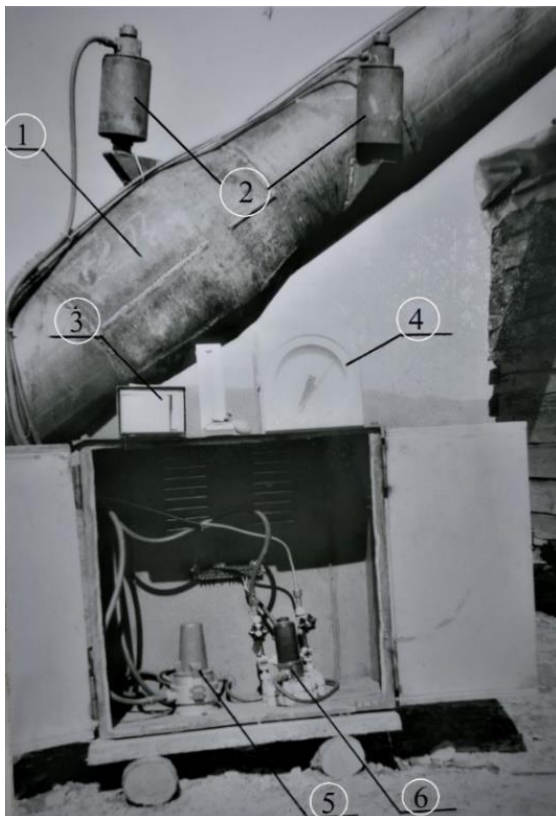


Рис.4.11. Расходомер с расширяющим устройством (труба «Антивентури») с измерительными устройствами. 1 – расходомер (труба «Антивентури»); 2 – разделители с эластичной диафрагмой; 3 – дифманометр расходомера ДМ-3537; 3 – самописец расходомера КСД-2; 4 – самописец гидростатического плотномера КСД-2; 5 – дифманометр плотномера; 6 – дифманометр расходомера

На рис. 4.12 и рис. 4.13 показано профильное трубопроводное устройство ∇ -образного вида, на котором смонтированы нестандартные устройства с регистрирующей измерительной аппаратурой.

Верхний и нижний участки отрезка пульповода использовались для работы гидростатического плотномера, а нисходящий участок ($\alpha=40^\circ$) - для работы расходомера. Первичные датчики (дифманометры) были расположены возле измерительного участка, а вторичные приводы с помощью кабеля вынесены на пульт управления в кабину гидромониторщика, что позволяло гидромониторщику контролировать и управлять технологическими процессами размыва и гидротранспортировании песков, поступающих из карьера на обогатительную фабрику, расположенную на расстоянии $\sim 2,4$ км.

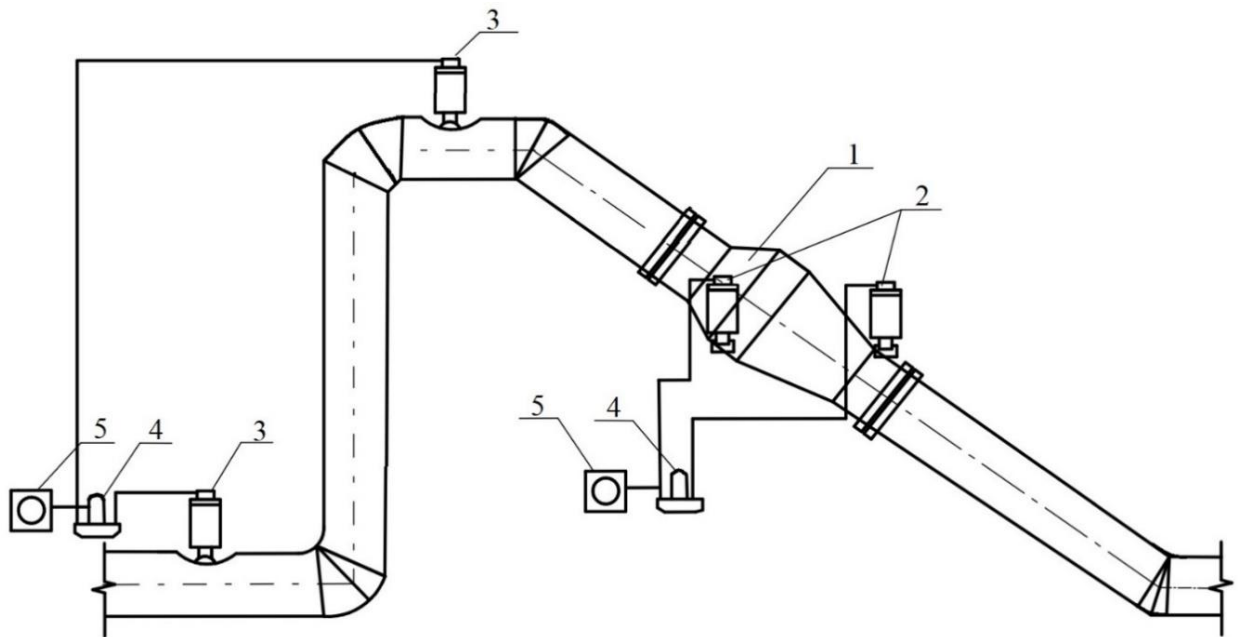


Рис.4.12. Принципиальная схема расположения контрольно-измерительных нестандартных устройств с аппаратурой для определения режима работы гидрокомплекса. 1 – гидродинамический расходомер, установленный на пульповоде ; 2 – отборники давления; 3 – отборник давления с шаровым датчиком; 4 – первичные приборы ДМ-3537; 5 – вторичные самопишущие приборы КСД-2 [46].

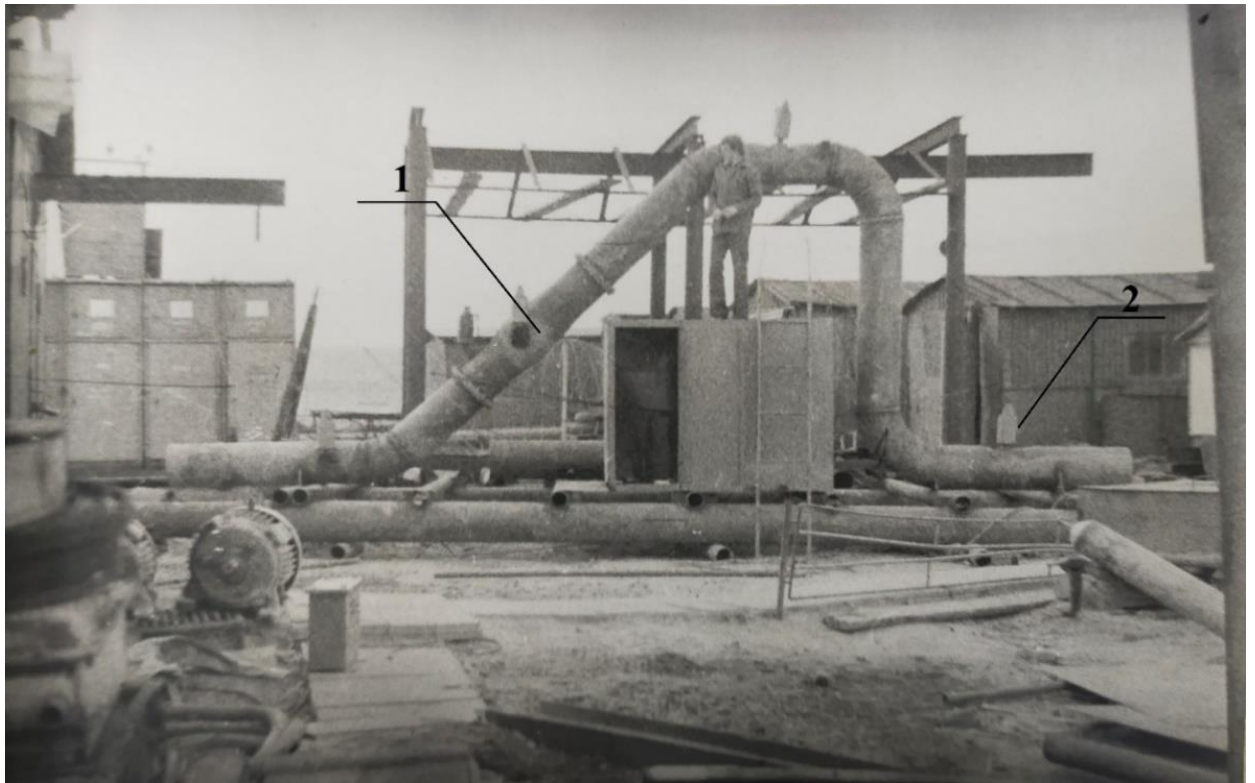


Рис. 4.13. Обустройство (монтаж измерительных устройств) на ИГОКе. 1 – труба «Антивентури»; 2 – гидростатический плотномер с шаровым датчиком К.В. Диминского.

Таким образом, все расходомерные устройства были оснащены контрольно-измерительной аппаратурой, фиксирующей на диаграммной ленте основные технологические параметры (расход и плотность) при движении гидросмеси.

4.3. Особенности и результаты тарировочных испытаний расходомеров на промышленном трубопроводе при проведении экскаваторно-гидравлических работ в условиях ИГОКа

Анализ расчетных значений потерь давления по различным методам расчета, проведенный в разделе 2.3 показывает их неоднозначность. Поэтому появилась необходимость скорректировать полученные значения экспериментальным путем при эксплуатации промышленного трубопровода с $D_{\text{внутр}}=410$ мм ($D_{\text{вн}}=426$ мм).

Установленное в предыдущем разделе уравнение (3.21), как отмечалось выше, не учитывает конкретные значения потерь давления в расходомере, то есть расход (производительность) по гидросмеси, рассчитанный по нему будет завышенным – теоретическим. Поэтому следующей задачей исследований являлось определение действительного его значения с введением поправочного коэффициента, называемого коэффициентом расхода μ , который устанавливался нами по результатам тарировочных опытно-промышленных исследований.

Тарировочные испытания расходомера проводились на карьере экскаваторно-гидравлических работ Иршинского ГОКа на промышленном трубопроводе с внутренним диаметром 410 мм при подаче гидросмеси забойной грунтонасосной установкой ГрТ-1600/50 на обогатительную фабрику на расстояние ~2,5 км (глава 4.1). Напорная вода к гидромониторам подавалась от насосной станции двумя перекачными насосами 300Д-90 [54].

Таблица 4.4

Технические характеристики насосов типа 300Д-90

Показатель	Значение
Подача, м ³ /ч	1080
Напор, м	69
Частота, об/мин	1500
Мощность, кВт	250
Масса насоса, кг	1034
Масса агрегата, кг	2035

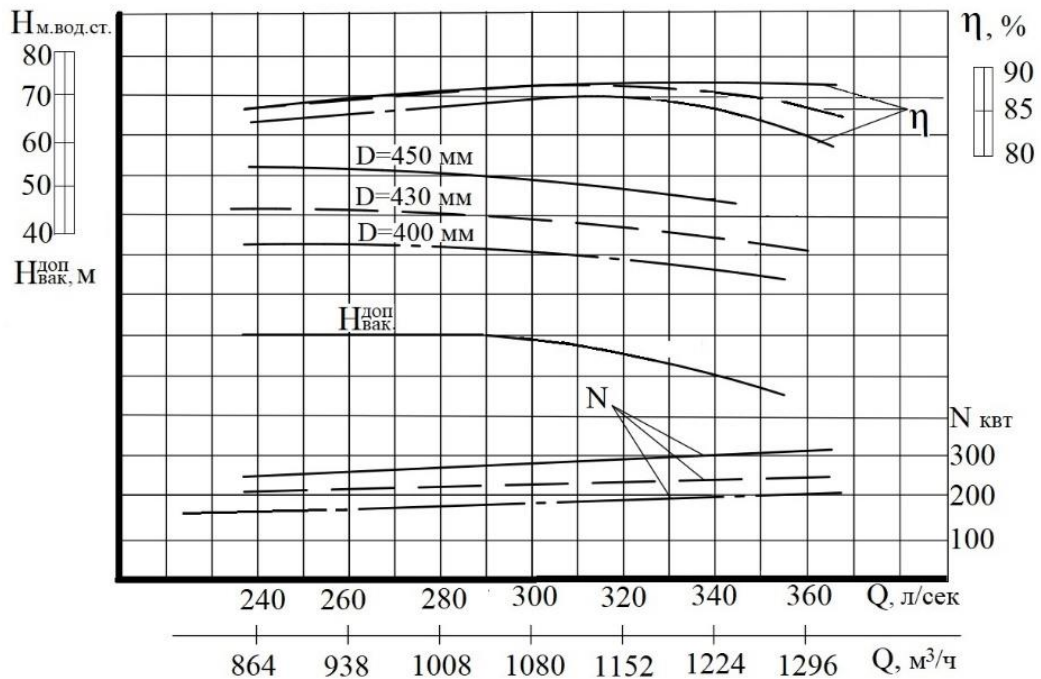


Рис.4.14. Характеристика насоса 300Д-90 при числе оборотов $n=980$ об/мин.

Измерительная схема нестандартных устройств и контрольной аппаратуры тарировочных исследований представлена на рис. 4.15. Она включала смонтированные на едином трубопроводе нестандартные устройства (расширяющим устройством «Антивентури» и сужающим - труба Вентури), которые, как и гидростатический плотномер с шаровым датчиком располагались на наклонном ($\sim 40-45^\circ$).

Для проведения испытаний водовод и пульповод были «закольцованы» (соединены) отрезком трубопровода с закругленным поворотным сегментом с задвижками, с помощью которых путем ее дросселирования изменялся и устанавливался намечаемый расход жидкости при тарировочных испытаниях расходомеров по воде, в т.ч. диафрагма ДК-25-450.

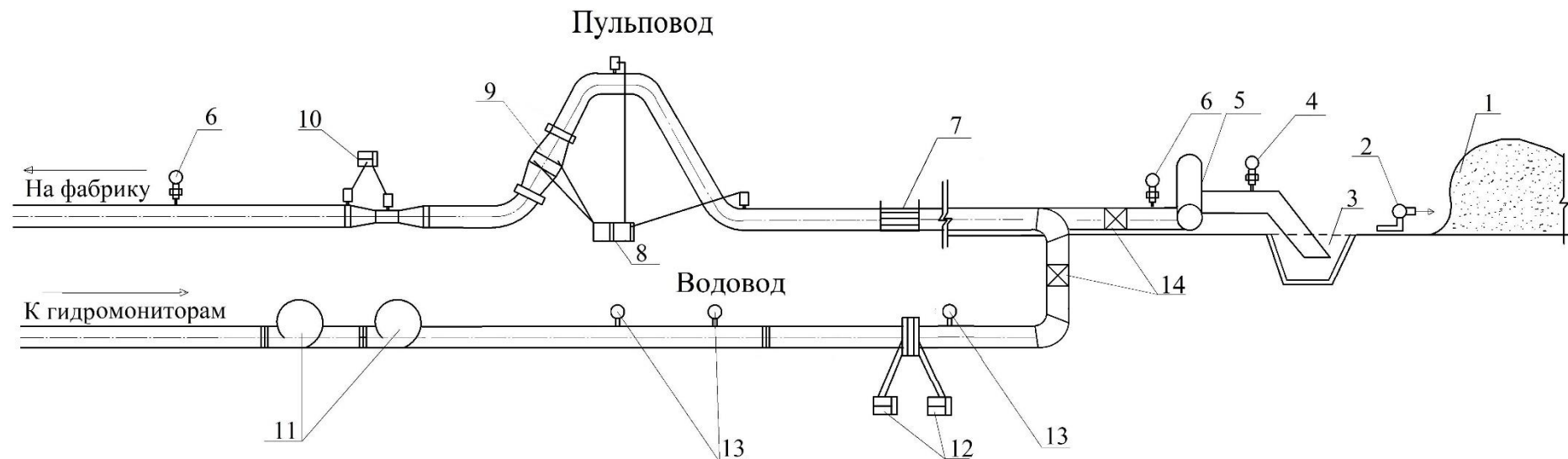


Рис.4.15. Измерительная схема параметров гидротранспортирования при проведении опытно-промышленных тарировочных испытаний на ИГОКе.

- 1 – навал горной массы, разрыхленный экскаватором ЭШ-5/45;
- 2 – гидромонитор ГМД-250 с дистанционным управлением;
- 3 – металлический зумпф с решеткой;
- 4 – вакуумметр;
- 5 – грунтонасос ГрТ-1600/50;
- 6 – дифференциальный манометр ДМ-3537 с разделителями;
- 7 – индукционный расходомер Индукция-51;
- 8 – плотномер с шаровым датчиком К.В. Диминского;

- 9 – расходомер с расширяющим устройством типа «труба Антивентури»;
- 10 – расходомер переменного перепада давления с сужающим устройством труба Вентури;
- 11 – дополнительные водяные насосы 300Д-90;
- 12 – расходомерная диафрагма ДК-25-450;
- 13 – образцовые манометры;
- 14 – задвижки;
- 15 – вторичные самопишущие приборы КСД-2.

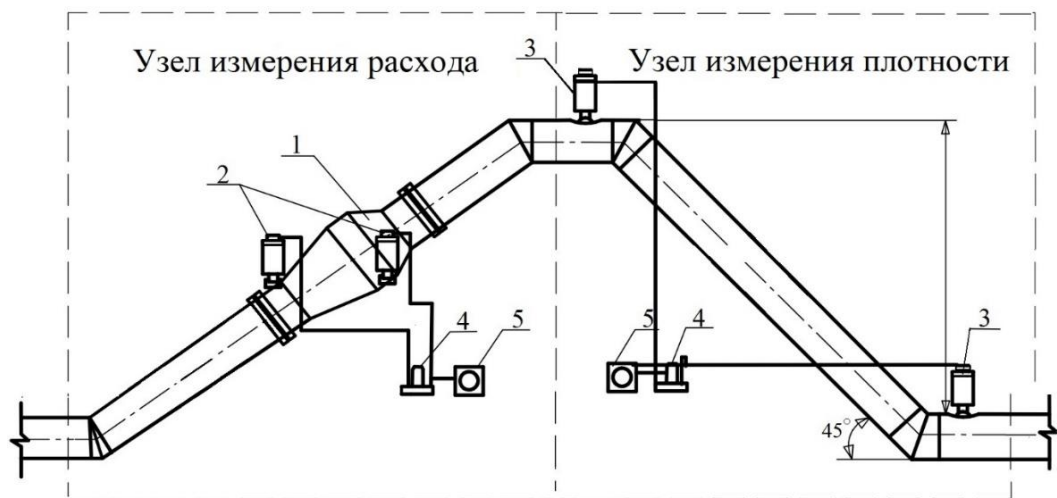


Рис.4.16. Измерительная система определения расхода и плотности гидросмеси. 1 – гидродинамический расходомер (труба «Антивентури»); 2 – отборники давления с эластичным разделителем; 3 – плотномер с шаровым датчиком К.В. Диминского; 4 – первичные приборы ДМ-3537; 5 – вторичные самопишущие приборы КСД-2 [46].



Рис.4.17. Общий вид установки системы определения расхода и плотности гидросмеси. 1 – гидростатический плотномер, 2 – расширяющее устройство расходомера гидросмеси, 3 – диафрагма ДК-25-450, 4 – пульповод $D_{\text{внутр}}=410\text{мм}$, 5 – водовод $D_{\text{внутр}}=450\text{мм}$, 6 – водяной насос 300Д-90.

Основным поверочным измерительным устройством тарировочных показаний расходомеров являлся электромагнитный расходомер типа "Индукция-51", с классом точности 1,5% (рис. 4.20). Он включал электромагнитный преобразователь расхода (ППР) и преобразующее устройство (П-1), которое имело унифицированный выходной сигнал постоянного тока 0...20 мА. Это позволяло ему работать в комплексе самопишущими приборами КСД-2, КСД-3 и др. [54]. Он предназначен для автоматического контроля расхода невзрывоопасной, неагрессивной жидкости в горнодобывающей, металлургической и других отраслях промышленности, а также в качестве расходомера для песчано-гравийных смесей. Предел измерения расхода составлял 2500 м³/ч. Диапазон измерения скоростей жидкости составлял от 1,0 до 10,0 м/с. Длина линии связи между преобразователем расхода и измерительным устройством ~100 м. Питание от сети переменного тока: напряжение 220 В, частота 50 Гц. Удаленность регистрирующих приборов от измерительного устройства до 1 км.



Рис.4.18. Измерение расхода гидросмеси электромагнитным расходомером «Индукция-51».

Тарировочные испытания расходомеров осуществлялись в рабочем

цикле эксплуатации гидрокомплекса на карьере при гидротранспортировании каолинизированных пород (песков) на обогатительную фабрику по трубопроводу наружным диаметром 426 мм (внутренний 410 мм).

Исследования проводились в двух режимах. Первый - при подаче воды по трубопроводу с использованием дополнительных измерений её расхода камерной диафрагмой ДК-25-450. Расчетные значения расходов воды (гидросмеси) по уравнению (3.21) устанавливались дросселированием задвижками на тарировочном электромагнитном приборе Индукция-51, одновременно сопоставляя с измеряемыми показаниями на других измерительных устройствах – трубах Вентури и «Антивентури», диафрагме ДК-25-450. В интервалах времени измерений по 20-30 минут каждый и по различиям в показаниях устройств устанавливали коэффициенты расхода для каждого из них (рис. 4.19).

Второй режим тарировочных испытаний производился при гидротранспортировании пульпы с объемной концентрацией ~10% и ~20%, измеряемой гидростатическим плотномером с шаровым датчиком К. В. Диминского (рис.4.6). Значения плотности гидросмеси регулярно контролировались объемно-весовым способом с тарировочной ёмкостью объемом 100 л, установленной на весах. Все испытания проводились комплексно в течение рабочей смены за определённый промежуток времени, контролируемый счётчиком фактической работы гидрокомплекса (обычно по 20-30 минут).

Таким образом решалась задача определения значений коэффициентов расходов и их сопоставлением со значениями потерь, полученных расчетным способом (см. раздел 3.2.2), представленные в таблице 4.5, а также на рисунках 4.19 и 4.20.

Таблица 4.5

Результаты измерений расходов воды ($\text{м}^3/\text{ч}$) при тестировании различными расходомерами в промышленном трубопроводе с внутренним диаметром $D_{\text{внутр}}=410$ мм ($D_{\text{внешн}}=426$ мм)

Наименование расходомеров			
Тарировочный Индукция-51	Антивентури 510/348	Вентури 410/306	Диафрагма ДК-25-450
1550	1519	1511	1488
1700	1666	1657	1632
1850	1813	1803	1776
2000	1960	1950	1920
2167	2123	2112	2080
Средний коэффициент расхода μ			
	0,98	0,975	0,96

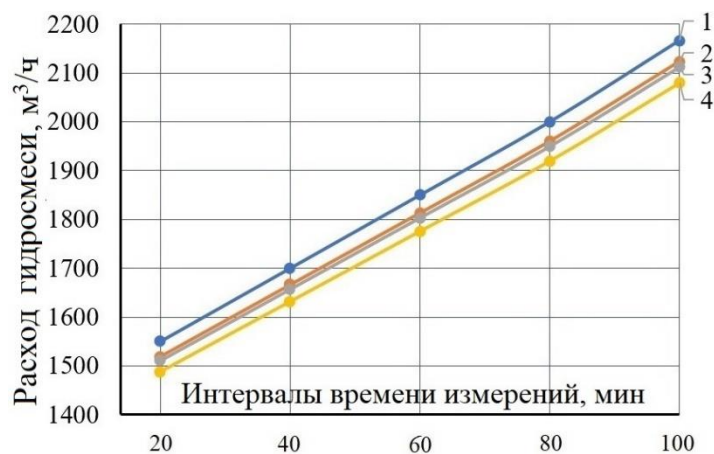


Рис.4.19. Результаты тарировочных измерений расхода воды во времени. 1 – Индукция-51; 2 – расходомер с расширяющим устройством (труба «Антивентури»); 3 – расходомер с сужающим устройством (труба Вентури); 4 – диафрагма ДК-25-450.



Рис.4.20. Гистограмма значения коэффициентов расхода μ по воде различных испытываемых расходомеров.

Анализ результатов тарировочных испытаний показал, что коэффициент расхода μ для расходомера с сужающим устройством (труба Вентури) и расширяющим устройством (труба «Антивентури») имеют близкие значения, равные 0,975 и 0,98, в отличие от диафрагмы - 0,96.

Таким образом, уравнение расхода гидросмеси «трубы Антивентури» приобретает окончательный вид:

$$Q = 0,98 \cdot K \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} + \Delta H. \quad (4.1)$$

Сравнение местных сопротивлений (потерь давления), установленных в производственных условиях при гидротранспортировании каолинизированных песков, измеренных расходомером с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури» типоразмера 510/348 мм показывает, что расхождение (увеличение) расчетных значений по различным методам расчета составляет более 40% [1, 28, 14, 115].

Неравнозначность местных сопротивлений в виде потерь давления (коэффициента расхода), установленных в производственных условиях на промышленном трубопроводе $D_{\text{вн}}=410$ мм с расчетными значениями по различным методикам (раздел 3.2.2) можно объяснить, что последние получены из опытов с трубами небольших диаметров при малых скоростях движения жидкости [1].

Большие значения потерь давления при измерении диафрагмой можно считать ее конструктивными особенностями – нет плавных переходов в виде конфузора и диффузора, присущих устройствам с изменением сечения потока. Так, при внезапном сужении и внезапном расширении потока в принципе имеет место потери давления на «удар», поэтому А.Д. Альтшуль, и И.Е. Идельчик рекомендательно вводят в уравнения коэффициент смягчения [1, 28].

На рис. 4.21 и табл. 4.6 показаны результаты опытно-промышленных исследований при гидротранспортировании каолинизированных песчаных

ильменитосодержащих пород с объемной концентрацией ~10-20%. Испытания проводились на промышленном трубопроводе с внутренним диаметром $D_{\text{вн}}=410$ мм расходомером с сужающим устройством (трубой Вентури) с размерами 410/306 мм и коэффициентом расхода $\mu=0,975$ при наработке 650 часов.

Таблица 4.6

Средние значения расходов транспортируемой гидросмеси ($\text{м}^3/\text{ч}$) с объемной концентрацией $S_1 \sim 10\%$ и $S_2 \sim 20\%$ по результатам тестирования в промышленном трубопроводе с внутренним диаметром $D_y=410$ мм

Наименование расходомеров			
ИНДУКЦИЯ-51		Антивентури	
$S_1 \sim 10\%$	$S_2 \sim 20\%$	$S_1 \sim 10\%$	$S_2 \sim 20\%$
1408	1280	1337	1177
1558	1430	1480	1315
1708	1580	1622	1453
1858	1730	1765	1591
2008	1880	1907	1729
Средний коэффициент расхода μ			
1		0,975	0,91

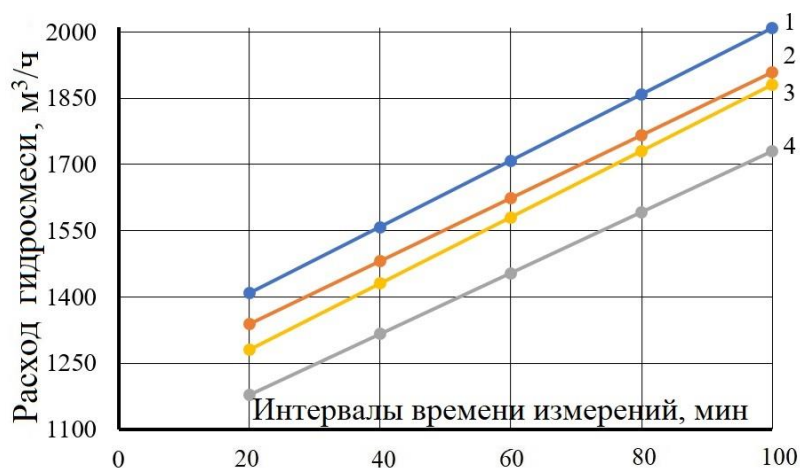


Рис. 4.21. Результаты опытно-промышленных измерений расхода гидросмеси с объемной концентрацией $S_1 \sim 10\%$ и $S_2 \sim 20\%$. 1 – Индукция -51 при $S_1 \sim 10\%$; 2 – Индукция-51 при $S_2 \sim 20\%$; 3 – труба «Антивентури» при $S_1 \sim 10\%$; 4 – труба «Антивентури» при $S_2 \sim 20\%$.

При эксплуатации его в течение этого времени (650 часов) были определены наиболее изнашиваемые элементы измерительного нестандартного устройства – конфузора и калибровочной (суженной) вставки:

в нижней части на 6-8 мм, а верхней на 2-4 мм при скоростях движения гидросмеси – ~8 м/с. Приняв среднее значение износа внутренних стенок ~9 мм типоразмер расходомера изменился и был равен 410/315 мм с уменьшенным коэффициентом расхода $\mu=0,91$ и увеличенной погрешностью измерений ~6%. При этом технологический ресурс расходомера Вентури в этих условиях составил ~110500 м³.

Анализ этих испытаний показал, что основной причиной абразивного износа является увеличенный скоростной режим в нестандартном устройстве, который был равен 7-9 м/с.

Дальнейшая проработка некоторых типоразмеров Вентури, представленных в табл. 4.7 и рекомендованных в работах [28, 66], показали, что они характеризуются также увеличенными скоростями в калибровочной вставке и, как следствие, возможным повышенным абразивным износом внутренних стенок измерительных устройств.

Таблица 4.7

№ п/п	Типоразмер т. Вентури	Расход гидросмеси, м ³ /ч, и скорости движения гидросмеси, м/с					
		$\mu=0,975$			$\mu=0,91$		
		Q, м ³ /ч	v_1 в трубопров., м/с	v_2 в суж. части, м/с	Q, м ³ /ч	v_1 в трубопров., м/с	v_2 в суж. части, м/с
1	300/256 m=1,37	1846	7,25	9,96	1723	6,77	9,3
2	410/306* m=1,8	2112	4,7	8,4	2054	4,3	7,75
3	410/315 m=1,7	2373	4,76	8,32	2215	4,44	7,76
4	509/413 m=1,52	4374	5,97	9,07	4083	5,57	8,46
5	613/510 m=1,44	6957	6,5	9,46	6493	6,1	8,83

*- типоразмер испытываемого в опытно-промышленных условиях расходомера.

Так как для точности измерения расхода большое значение имеет постоянное проходное сечение, то для поддержания скоростного режима в технологии гидротранспортирования при измерении его сужающим устройством Вентури необходимо либо футеровать внутреннюю поверхность элементов и калибровочной цилиндрической вставки износостойким материалом (сормайтом), либо выполнять трубу Вентури разъемной - с вкладышами из специальной стали для замены по мере износа [54].

Выводы по главе 4.

Для измерения параметров гидротранспортирования контрольно-измерительной аппаратурой переменного перепада давлений сотрудниками кафедры МГРИ геотехнологических способов и физических процессов горного производства и ПТО Иршинского ГОКа был разработан и смонтирован масштабный измерительный полигон.

Он включал трубопровод диаметром 450 мм, подающий воду от насосов 300Д-390 к гидромониторам и забойной грунтонасосной установке, с расходомерной диафрагмой ДК-25-450, а также рабочий пульповод с внутренним диаметром 410 мм, транспортирующим гидросмесь от насоса ГрТ-1600/50 на расстояние до 2 км на обогатительную фабрику. На нем были смонтированы нестандартные устройства расходомеров: диафрагма ДК-25-450, трубы Вентури типоразмера 410/306 мм и Антивентури типоразмера 510/348 мм, а также гидростатический плотномер с первичными датчиками – дифманометрами ДМ-3537 и самопишущими приборами КСД-2 и КСД-3, а также индукционный расходомер Индукция-51 с классом точности 1,5%, который являлся основным поверочным тарировочным измерительным устройством.

Таким образом, впервые в измерительной практике были проведены синхронные тарировочные испытания одновременно работающих на одном

промышленном трубопроводе следующих приборов переменного перепада давления: диафрагма ДК-25-450, труба Вентури типоразмера 410/306 мм и труба Антивентури типоразмера 510/348 мм.

При этом были получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

- коэффициенты расхода по воде для расходомеров с сужающим и расширяющим устройствами имеют близкие значения, соответственно равные 0,975 и 0,98; диафрагма - 0,96. При гидросмеси с объемной концентраций 10÷20%, коэффициенты расхода снижаются:

- для трубы Вентури до 0,91;
- для трубы Антивентури до 0,92.

- технологический ресурс трубы Вентури имеет ограничения в объеме перекачиваемых пород ~110500 м³ и наработку 650 часов, вследствие увеличенных скоростей потока гидросмеси в суженной (калибровочной) части и повышенного абразивного износа;

- для трубы Антивентури истирание внутренних стенок не является проблемой ввиду небольших скоростей в расширяющей (калибровочной) части, где производится отбор давлений;

- фактические потери давления, полученные при промышленном тестировании, имеют пониженные значения (примерно на 40%), по сравнению с величинами, рассчитанными по методикам различных авторов (А.Д. Альтшуль, И.Е. Идельчик, Е.З. Рабинович, Б.Т. Емцев) и могут быть рекомендованы при конструировании расходомеров с расширяющим устройством при разработке системы управления режимов работы гидрокомплексов.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОДОБЫЧЕЙ КОМПЛЕКСА «КАРЬЕР- ОБОГАТИТЕЛЬНАЯ ФАБРИКА»

5.1. Эргономические факторы, реализуемые при внедрении системы оперативного управления гидродобычей карьера

Результаты апробации и внедрения системы оперативного управления гидродобычей карьера экскаваторно-гидравлических работ выражается в тесной взаимосвязи с эргономическими факторами, присущими взаимодействию деятельности человека с элементами оптимизации производительности технологического процесса: внедрением пульта управления, современной конструкцией кабины гидромониторщика, с учетом бытовых антропометрических, психофизиологических и других условий трудовой деятельности.

Так, гидромониторщик в кабине с пультом управления, оснащенным измерительной аппаратурой, ведет контроль и регулирование режимов работы шагающего экскаватора ЭШ-5/45, осуществляющего выемку горной массы и ее отсыпку в навал для размыва двумя гидромониторами ГМД-250с; также осуществляется регулирование по показаниям контрольно-измерительных приборов параметров размыва и пульпоприготовления на решетке зумпфа грунтонасоса ГрТ-1600/50 и подачи гидросмеси на обогатительную фабрику, расположенную на расстоянии до 2,5 км. Кроме того, контролируется расход воды, подаваемой в гидромониторно-грунтонасосный комплекс, и учет его фактического времени работы.

Оператор на обогатительной фабрике по показаниям оперативной системы управления регулирует подачу гидросмеси на обогатительное устройство, стабильность которого является важным условием повышения

уровня извлечения полезного ископаемого, и ведет учет поступающей для технологического передела горной массы.

Немаловажным положительным фактором эргономики в таких производственных условиях является то, что операторы взаимодействуют с техническими измерительными устройствами, способствующими длительному поддержанию работоспособности рабочего и инженерно-технического персонала на высоком уровне.

Таким образом, эргономика в данном случае рассматривает производственную деятельность человека, скорость освоения им новой техники, затраты его энергии для повышения производительности и интенсивности труда в целях оптимизации проведения технологического процесса всего комплекса «карьер-обоганительная фабрика» при конкретных видах деятельности.

5.2. Основные задачи и назначение системы оперативного управления гидродобычей карьера

Создание и внедрение системы оперативного управления гидродобычей карьера включали в себя комплекс измерительных устройств для контроля и регулирования режимов работы гидрокомплекса на Иршинском ГОКе (рис. 5.1) и были обусловлены следующими положениями:

- используемые на карьере методы учета объемов пород, транспортируемых на обоганительную фабрику, или не позволяли получать оперативную информацию, или она была недостаточно точна;
- не имея достоверной оперативной информации, гидромониторщик управлял производственным процессом интуитивно, полагаясь на свой опыт и навыки;

- инженерно-технические работники не могли оперативно анализировать работу гидродобывчного комплекса в течение рабочего времени и принимать соответствующие решения.

Поэтому актуальным для предприятия являлось решение следующих производственных задач:

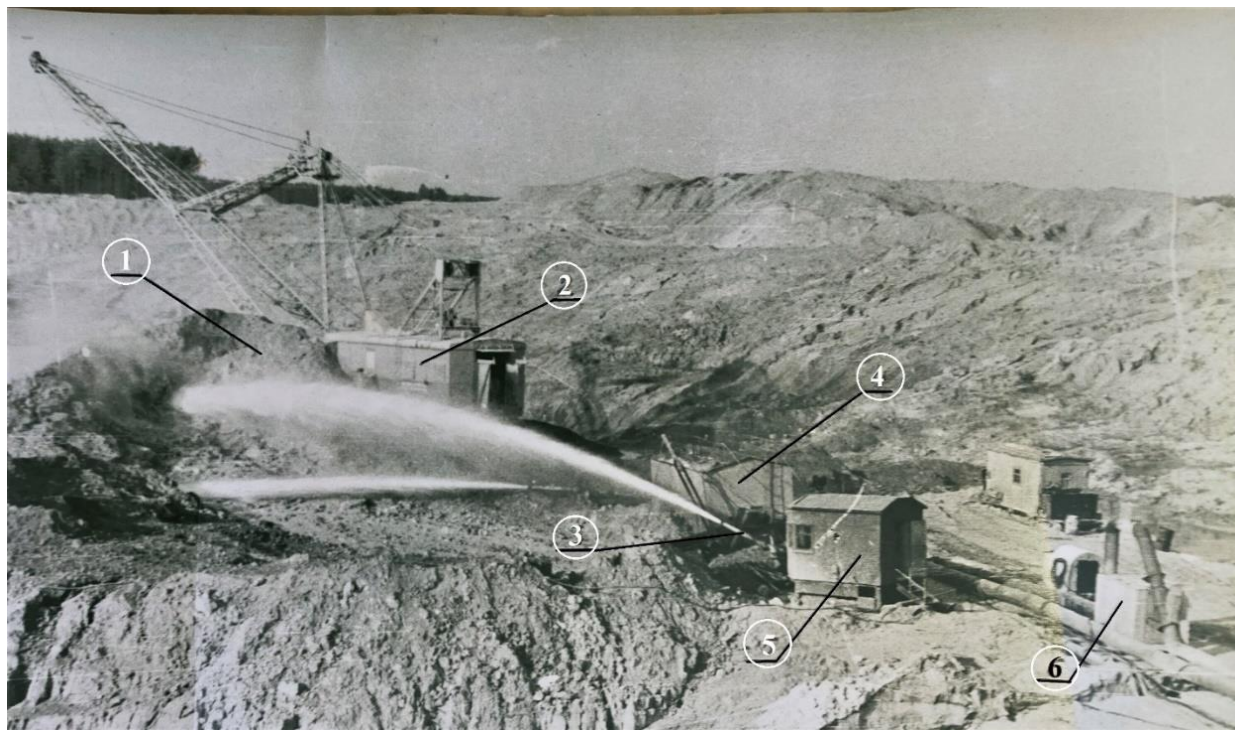
- поддерживать наиболее эффективные режимы работы всего комплекса «карьер-обогащительная фабрика»;
- организовать оперативный контроль объемов ильменитосодержащих пород, подаваемых на обогащительную фабрику;
- исключить длительную малопродуктивную работу оборудования;
- повысить полноту извлечения полезного компонента за счет стабильной подачи гидросмеси из карьера на обогащительную фабрику;
- своевременно принимать меры при опасности возникновения аварийных ситуаций.

Кроме этого, решались эргономические задачи, связанные с взаимодействием человека и техники для создания условий оптимизации трудовых процессов:

- улучшение условий труда;
- создание удобного рабочего места; стола, пульта управления, размещение приборов и устройств управления, освещение рабочего места, воссоздание оптимального микроклимата и температурного режима в помещении;
- взаимодействие оператора со всеми технологическими элементами управления: их доступность и необходимые усилия, эффективность и скорость доступа, согласованность регулирующих воздействий, расположение контрольно-измерительной аппаратуры.

Выполнение этих задач в целом, как производственных, так и эргономических, дало возможность увеличить производственную мощность

карьера и обогатительной фабрики, снизить себестоимость единицы продукции, повысить извлечение ильменита.



***Рис.5.1.** Забой экскаваторно-гидравлической добычи. 1 – навал ильменитосодержащих пород; 2 – шагающий экскаватор ЭШ-5/45; 3 – гидромониторная установка с дистанционным управлением ГМД-250; 4 – землесосная установка ГрТ-1600/50; 5 – кабина гидромонитора с пультом управления гидромониторно-грунтонасосной установкой.*

5.3. Обустройство системы оперативного управления гидродобычей карьера

Система оперативного управления гидродобычей карьера позволяла осуществлять в ритме производственного процесса оперативный контроль и регулирование следующих гидротехнических параметров:

- мгновенных и суммарных производительностей насосной станции по воде, поступающей в карьер;
- мгновенной и суммарной производительности грунтонасосной установки ГрТ-1600/50 по гидросмеси, транспортируемой из карьера на обогатительную фабрику;

- мгновенной и средней объемной плотности транспортируемой гидросмеси за определенный промежуток времени;
- мгновенных и суммарных производительностей карьера по «пескам», поступающим на обогатительную фабрику;
- фактического времени работы гидротранспортного оборудования [46].

Устройства, создающие переменный перепад давления, включали:

- расходомерную диафрагму ДК-25-450 для измерения расхода воды, установленную на прямом участке водовода с внутренним диаметром 450 мм (рис.5.2);

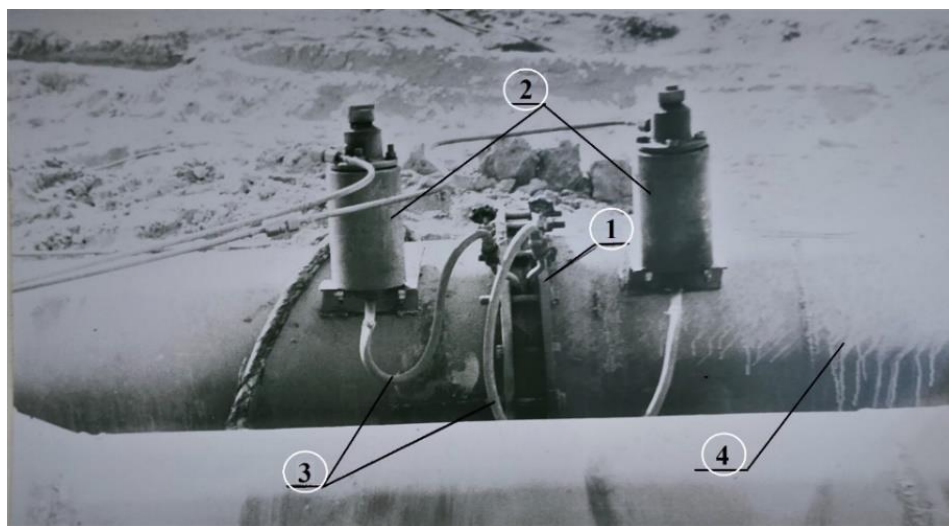


Рис.5.2. Измерение расхода воды диафрагмой типа ДК-25-450. 1 – диафрагма; 2 – регуляторы; 3 – импульсные трубки, 4 – водовод.

- расширяющее приёмное устройство гидродинамического расходомера (труба «Антивентури») типоразмера 510/348 мм;
- вертикальные и наклонные участки трубопровода ($40-45^\circ$) с внутренним диаметром $D_y=410$ мм.

Система была смонтирована в двух вариантах: в передвижном - на санях, который позволил использовать её при работе гидромониторно-грунтонасосного комплекса ГрТ-1600/50 в различных заходках карьерного поля при перемещении фронта горных работ (рис.5.3) [54].

Другие две системы оперативного управления гидрокомплексом были смонтированы и апробированы в стационарном варианте на рабочем и резервном трубопроводах при подъеме на обогатительную фабрику (рис.5.4).

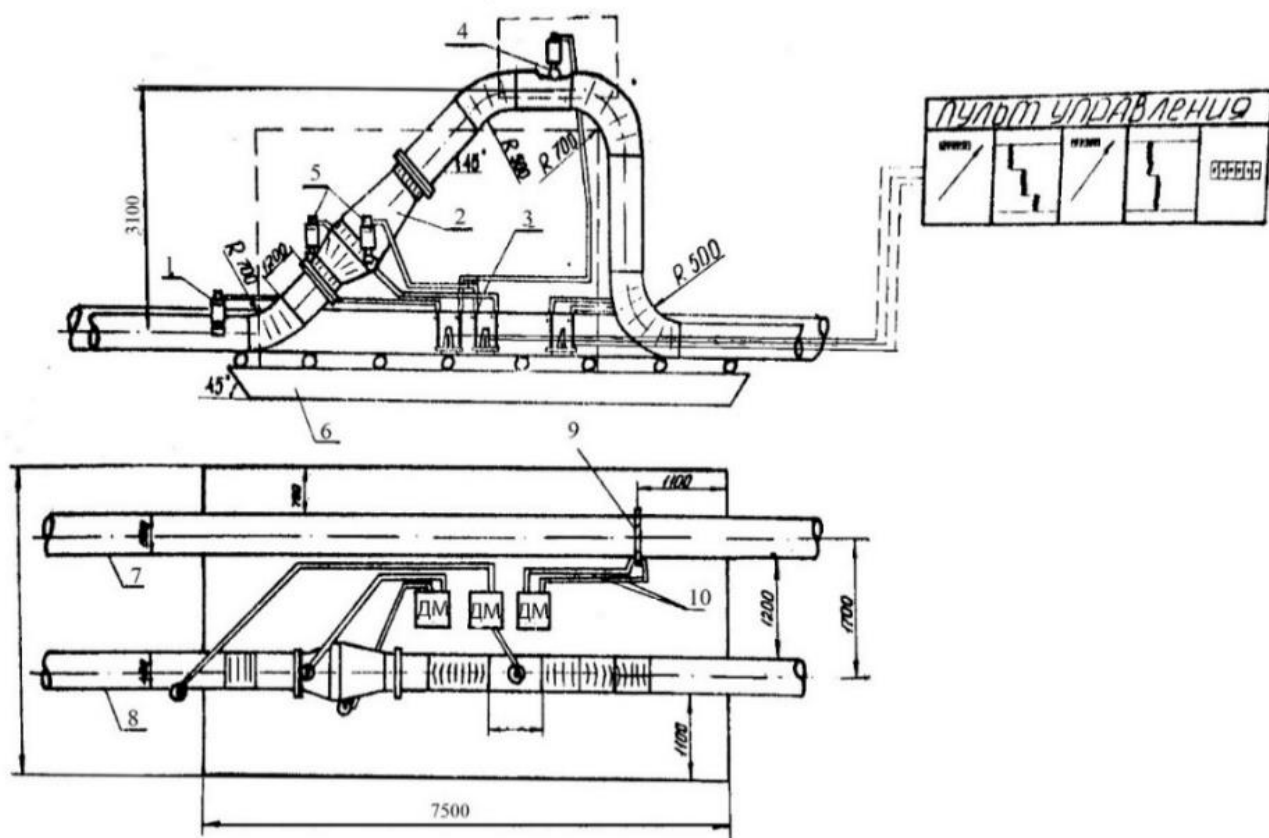


Рис.5.3 а). Схема передвижной системы контроля и регулирования параметров гидродобычного комплекса. 1 – разделитель с эластичной диафрагмой плотномера; 2 – гидродинамический расходомер типа «трубы Антивентури»; 3 – первичные датчики ДМ-3537; 4 – шаровой датчик с разделителем плотномера; 5 - разделители с эластичной диафрагмой плотномера; 6 – сани; 7 – водовод с Ду=450 мм; 8 – пульповод с Ду=400 мм; 9 – расходомерная диафрагма типа ДК-25-450; 10 – импульсные трубки.

Все нестандартные устройства, создающие переменный перепад давлений, были оснащены контрольно-измерительной аппаратурой, в т.ч. первичным дифманометром ДМ-3537, преобразующего перепад давлений в пропорциональный унифицированный электрический сигнал, а также вторичными самопишущими приборами с интеграторами КСД-2 и КСД-3.



Рис.5.3 б). Передвижная установка измерения параметров гидротранспортирования на расстояние до 2 км из карьера на обогатительную фабрику.

Кроме того, в систему оперативного управления был подключен счётчик чистого времени сигнального устройства, установленного на приёмном зумпфе обогатительной фабрики.

Все перечисленные устройства и датчики с электрическим обогревателем для работы в зимних условиях находились в закрытых помещениях. Вторичные самопишущие приборы типа КСД-2 и КСД-3 с помощью двенадцатижильного кабеля длиной 450 м были вынесены на пульт управления в новую кабину гидромониторщика, а вторичные показывающие приборы - на пульт управления обогатительной фабрики.

5.4. Разработка и эксплуатация кабины гидромониторщика

По предложению предприятия сотрудники кафедры разработки россыпных месторождений МГРИ разработали эскизы, а конструкторский отдел ИГОКа сконструировал более совершенную кабину гидромониторщика с новым пультом управления. Было изготовлено три таких кабины, которые эксплуатировались в различных добычных заходках по мере продвижения фронта горных работ.

Кабина гидромониторщика, смонтированная на санях, была изготовлена из дерева, снаружи она обшивалась кровельной сталью, внутри прокладывался утеплитель из минераловатных плит и отделка из ДСП. Под кабиной на санях были расположены специальные ящики для хранения инструментов. В ней были установлены окна высотой 1,5 м общей длиной 4,5 м, обеспечивающие большой сектор обзора, в который попадала вся рабочая зона гидромониторов, а также технологическое оборудование. Она оборудовалась съёмной лестницей с перилами. Для освещения рабочей зоны гидромониторщика в ночное время на крыше кабины устанавливались два прожектора типа ПЗС-25 с мощностью ламп 200 В.

В кабине располагались: новый пульт управления гидромониторщика, кресло, шкафы бытового назначения, силовая распределительная панель, а также шкафы, предназначенные для измерительных приборов, необходимых гидромониторщику для контроля режима работы оборудования и управления технологическим процессом. Помещение было оборудовано осветительными устройствами и обогревателями элементами.

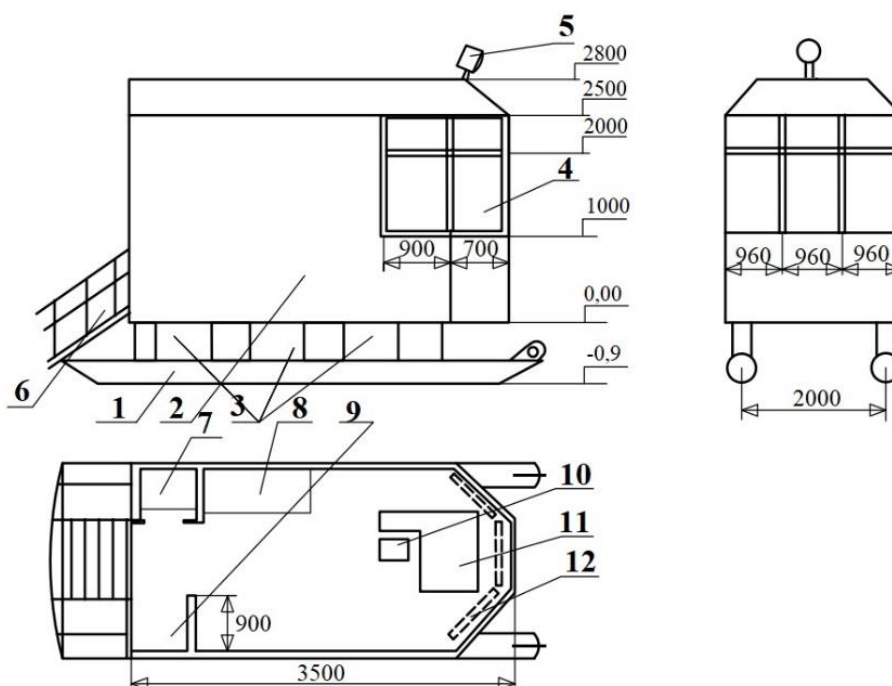


Рис.5.5 а). Общий вид кабины гидромониторщика. 1 – сани; 2 – кабина; 3 – ящики для хранения инструментов; 4 – окна; 5 – прожектор; 6 – съемная лестница с перилами; 7 – бытовой шкаф; 8 – шкаф для хранения измерительных приборов; 9 – силовая распределительная панель; 10 – кресло; 11 – пульт управления гидромониторщика; 12 – осветительные устройства и обогревательные элементы.



Рис. 5.5 б. Общий вид кабины гидромониторщика. 1 – кабина; 2 – задвижка; 3 – водовод; 4 – гидромонитор ГМД-250.

Внедрение новой кабины гидромониторщика позволило:

- сконцентрировать все средства управления комплексом в одном месте (в забое);
- обеспечить размещение в ней всех необходимых для работы контрольно-измерительных приборов;
- существенно улучшить условия труда, повысить культуру производства (улучшить температурный режим в помещении, наладить систему наружного и внутреннего освещения, снизить уровень шума, уменьшить запыленность помещений, улучшить режимы труда и отдыха, улучшить оснащение и оформление рабочего помещения) [55].

5.5. Разработка и эксплуатация пульта управления гидрокомплексом гидромониторно-грунтонасосной установки

Пульт управления, установленный в новой кабине гидромониторщика, включал в себя средства контроля работы оборудования гидродобычного комплекса, а также регулирования параметров гидротранспортирования.

Конструктивно он представлял собой фигурный стол с каркасом, выполненным из металлических уголков стеклотекстолитом толщиной 12 мм и был смонтирован на ножках, длина которых могла быть изменена в зависимости от необходимой установки по месту. Стол включал панели: для размещения контрольно-пусковых устройств, контрольно-измерительных приборов и панель бытового назначения. Подлокотники были приспособлены для удобного расположения рук гидромониторщика при управлении гидромониторами, и на них располагались переключатели управлением работы гидромониторов.

Пульт состоял из средств управления оборудованием гидродобычного комплекса и средств управления технологическим процессом. На передних горизонтальных панелях располагались кнопочные посты управления гидромониторами, перекачными землесосами, насосом дополнительной воды,

забойными землесосами (а также сигнальные лампы их включения), трансформаторами, пакетными выключателями наружного и внутреннего освещения, телефонными розетками [54].

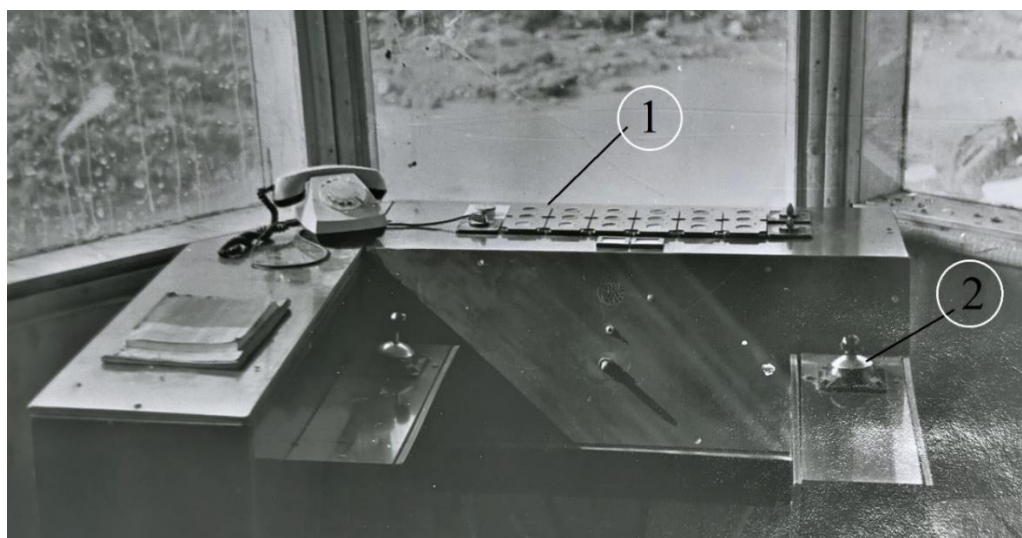


Рис.5.6. Вид из кабины гидромониторщика с пультом управления. 1 – кнопки регулирования технологическими режимами гидромониторно-грунтонасосной установкой комплекса; 2 – рычаги управления гидромонитором.

На передней наклонной панели располагались тумблер включения производственной громкоговорящей связи (ПГС) и микрофон. На боковой - устанавливался телефон, а внутри неё блок ПГС. Таким образом, оказалось возможно производить управление всем оборудованием гидравлического комплекса из одного места. Из кабины гидромониторщика осуществлялось не только управление гидромониторами, но и запуск-остановка перекачного грунтонасоса, насоса дополнительной воды, включения наружного и внутреннего освещения, отопления, сварочного аппарата.

На рис.5.7 и рис. 5.8 представлены приборы и результаты измерений расходов и плотности транспортируемой гидросмеси на диаграммах самопишущего прибора [55].

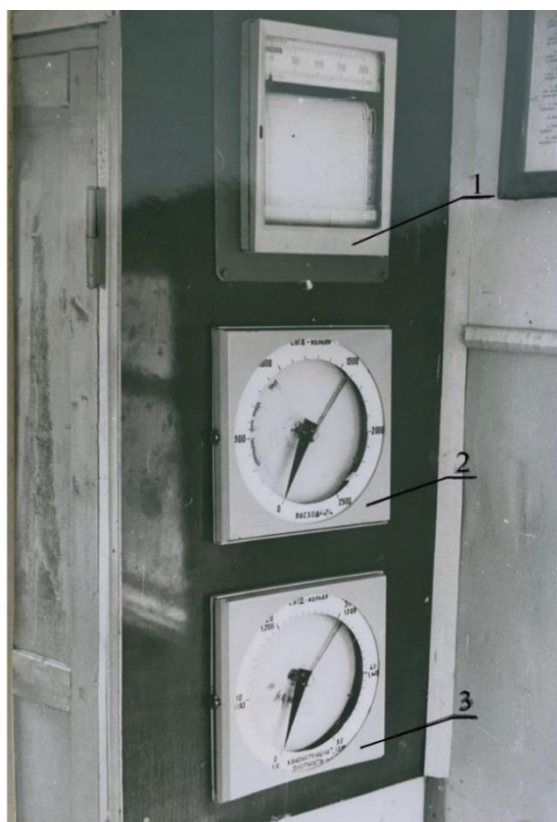


Рис.5.7. Самопишущие приборы для контроля технологических параметров. 1 – самопишущий прибор КСД-2 расходомера воды; 2 – самопишущий прибор КСД-2 гидродинамического расходомера; 3 – самопишущий прибор КСД-2 гидростатического плотногомера.

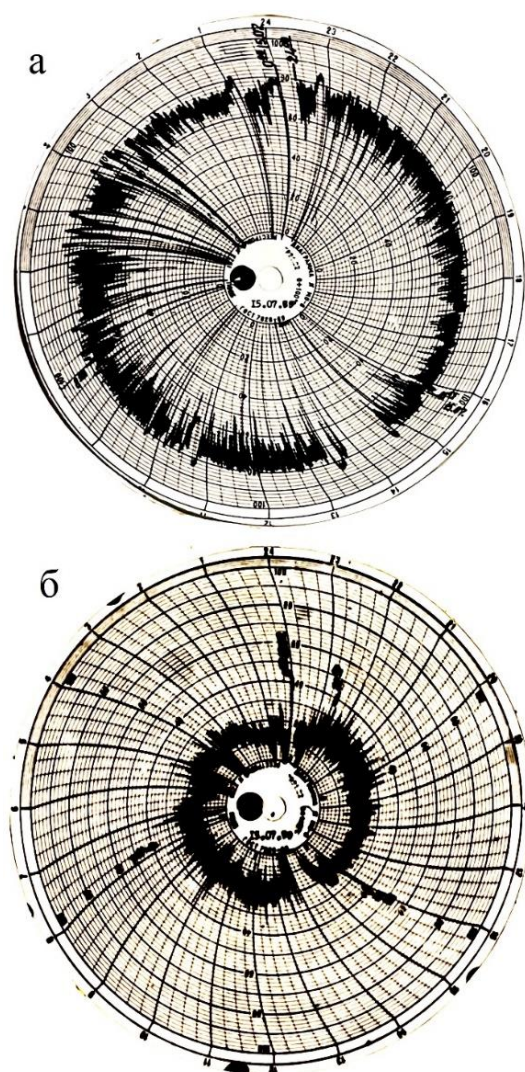


Рис.5.8. Типовые расходомерная (а) и плотномерная (б) диаграммы результатов тарифовочных исследований самопишущих вторичных приборов.

5.6. Результаты апробации системы оперативного управления гидродобычей карьера

Передвижная система оперативного управления гидродобычей карьера, в отличие от стационарной на обогатительную фабрику, устанавливалась

вслед за перемещением фронта горных работ на различных гидротранспортных линиях при отработке разных заходок карьера.

В процессе наладки и эксплуатации систем неоднократно проводились контрольные замеры для выявления точности и надежности их работы. По результатам этих замеров был сделан вывод, что показания измерительных комплексов по объёму переработанной горной массы не выходят за пределы точности маркшейдерских замеров.

В процессе эксплуатации измерительных систем, как стационарных, так и передвижных, в журналах учёта и контроля записывались результаты замеров по каждой смене таких параметров как: фактическое время работы добычного комплекса, производительность по гидросмеси и твёрдому, плотность гидросмеси, количество воды, поступающей к гидромониторам.

Оперативный контроль позволил визуально оценивать взаимосвязь плотности формируемой гидросмеси с особенностями работы гидромониторно-грунтонасосного комплекса. Постоянная запись показаний гидростатических плотномеров и расходомеров дала возможность проанализировать ход производственного процесса во времени. В результате оперативного управления процессом размыва пород и пульпоприготовления, оказалось возможным:

- даже в сложных условиях отрицательных температур удалось повысить объёмную плотность гидросмеси свыше 10% против 5-8% - т.е. среднего уровня работы без использования показаний приборов, в обычных условиях работы;
- поддерживать производительность по каолинам на уровне плановой, а для песков - до 220 м³/ч и выше, что значительно превосходило плановые показатели;
- стабилизировать производственный процесс.

Применение системы оперативного управления гидродобычей карьера позволило проводить детальный хронометраж основных технологических показателей работы гидродобывного комплекса карьера, резервы, наметить пути повышения коэффициента использования рабочего времени, контролировать загрузку добычи в новое обогатительное оборудование, наиболее полно оценить квалификацию гидромониторщиков, провести учёбу гидромониторщиков, проводить производственные исследования по совершенствованию технологии горных работ.

Эффективность от внедрения системы оперативного управления гидродобычей карьера выражается в следующем:

- поддержание производственного процесса в заданных режимах (при этом исключается длительная малопродуктивная работа гидравлического оборудования);
- достижение согласованной работы всего комплекса карьер-фабрика за счёт вскрытия и устранения дефектов в работе, выявления резервов и "узких" мест по отдельным производственным процессам;
- создание нормальных условий работы оборудования, увеличение межремонтных периодов и повышение коэффициента его использования;
- снижение некоторых видов энергетических затрат;
- увеличение извлечения металла за счёт стабильной подачи гидросмеси на обогатительную фабрику;
- повышение производительности труда;
- снижение себестоимости конечной продукции.

Кроме экономии денежных и материальных средств, система контроля и учёта повысила оперативность управления производственным процессом, обеспечила большую безопасность и более высокую культуру труда гидротранспортирования, а также помещения бытового назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обобщение опыта и анализ гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых в различных отраслях промышленности показывает эпизодическое либо полное отсутствие систематического контроля основных параметров гидротранспортирования - расхода и плотности гидросмеси, что не позволяет регулировать текущие режимы технологического процесса и, как следствие, повышение часовой производительности гидрокомплекса.

2. На основе анализа способов и технических средств контрольно-измерительных устройств напорного гидротранспортирования пород выявлено, что рациональными для гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых являются приборы переменного перепада давления, отличающиеся простотой конструкции и монтажа, не требующие тарировочных поверок, с достаточной точностью и надежностью измерений

3. Дано обоснование применения гидродинамического расходомера с расширяющим устройством типа "трубы Антивентури", отличающегося отсутствием истирания внутренних стенок при отборе давления в калибровочной цилиндрической вставке ввиду небольших скоростей движения пульпы и, как следствие, повышенного технологического ресурса и наработки измерительного устройства.

4. Аналитически установлены функциональные зависимости изменения потерь энергии (давления) диффузорной части расходомеров: угла расширения α , степени расширения n , длины диффузора l_d ; для испытанного в промышленных условиях типоразмера $\frac{D}{d} = \frac{510}{348}$ мм ($\alpha=7^\circ$, $n = 2,15$) они не превышают 2%.

5. На основе установленных функциональных зависимостей составлена номограмма взаимосвязи геометрических параметров

диффузорной части расходомера (угол расширения α , степень расширения n , длина диффузора l_d), и их влияние на изменение значений потерь энергии (давления), позволяющие выявить оптимальный типоразмер гидродинамического расходомера с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури».

6. Разработка и апробация измерительных устройств для текущего контроля и регулирования параметров гидротранспортирования в двух технологических вариантах: в стационарном (на обогатительной фабрике) и передвижном (на санях) при работе гидромониторно-грунтонасосной установки ГрТ-1600/50 в различных заходках при перемещении фронта горных работ позволили осуществить в ритме производственного процесса оперативное управление всего гидродобычного комплекса «карьер-обогатительная фабрика».

7. Создание системы оперативного управления гидродобычей комплекса «карьер-обогатительная фабрика» позволила реализовать эргономические факторы, присущие взаимодействию оператора с элементами оптимизации технологических операций, которые заключались в разработке и внедрении новой конструкции кабины гидромониторщика с пультом управления, включающего панели для размещения пусковых устройств технологического оборудования, контрольно-измерительных приборов, регистрирующих мгновенные и суммарные значения параметров гидротранспортирования, а также отсеки бытового назначения.

8. Впервые проведено одновременно промышленное тестирование расходомеров переменного перепада давления: диафрагмы ДК-25-450, трубы Вентури типоразмера 410/306 мм, трубы Антивентури 510/348 мм при гидротранспортировании песков по трубопроводу с внутренним диаметром 410 мм и определены их коэффициенты расхода по воде соответственно

равные 0,96, 0,975 и 0,98; установлено, что при измерениях на гидросмесях с концентрацией 10÷20%, значения последних двух снижаются до 0,91 и 0,92.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления, 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Недра, 1982. - 224 с.
2. Баранов Ю.Д., Блюсс Б.А., Семененко Е.В., Шурыгин В.Д. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий. Изд.: Новая идеология, Днепропетровск, 2006 г. - 416 стр.
3. Бобов А.А., Германский П.Н., Гаромак А.В. и др. О контроле параметров гидротранспорта. Тезисы докладов научно-технической конференции. «Гидротранспорт-86», Москва, 1986 г.
4. Брюховецкий О. С. Основы гидравлики. Учебное издание. Недра, 1991, 157 с.
5. Брюховецкий О. С. Рудничный напорный гидравлический транспорт горной массы. Учебное пособие для вузов, 196 с.
6. Брюховецкий О.С., Антипова О.В.К расчету параметров гидротранспортирования пород вскрыши Лебединского месторождения КМА. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2010. № 1. С. 76-78.
7. ГОСТ 23720-79 Трубы Вентури. Технические условия
8. ГОСТ 26969-86.
Диафрагмы для измерения расхода жидкостей и газов стандартные. Технические условия.
9. ГОСТ 8.586.5-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5.
10. Демьянов С.Е. Повышение эффективности грунтовых насосов гидротранспортных систем на горных предприятиях регулированием режимов их работы. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по ВАК 05.05.06, г. Санкт-Петербург, 2010 г.

11. Джваршеишвили А. Г. Системы трубного транспорта горно-обогатительных предприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Недра, 1981, 384 с.
12. Длоугий В.В. Комплексная гидромеханизированная переработка песчано-гравийных материалов на водном транспорте: (Исследование рабочих процессов и новые виды оборудования): Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук. (472) // Ленингр. ин-т водного транспорта. - Ленинград, 1971.
13. Дмитриев Г. П., Махарадзе Л. И., Гочиташвили Т. Ш. Напорные гидротранспортные системы: Справочное пособие. –М.: Недра, 1991, 304 с.
14. Докукин В.П. Формирование системы трубопроводного гидротранспорта горных предприятий на основе метода динамической оптимизации ее параметров. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по ВАК 05.05.06, г. Санкт-Петербург, 2005 г.
15. Долгачев Ф. М. Основы гидравлики и гидропривод: [Учебник для строит. техникумов по спец. 0561 "Строит. машины и оборуд."]
// Ф. М. Долгачев, В. С. Лейко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Стройиздат, 1981. - 183 с.
16. Дробаденко В. П., Вильмис А.Л., Луконина О.А., Салахов И.Н. Технология сооружения штабеля кучного выщелачивания средствами гидротранспортирования // В сборнике: Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ). Материалы Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах. 2018. С. 30-32.
17. Дробаденко В. П., Гриневич В. В., Антонов Ю. Г. Опыт работы комплекса "Гидроэлеватор-грунтовый насос" при подаче песков на обогащение// -М.: Экспресс-информация, 1988 №7, 20 с.

18. Дробаденко В. П., Диминский К. В., Александров И. Л., Чепов С. Ю. Установка для гидротранспорта сыпучих материалов // Патент SU 1168496, опубл. 23.07.1985
19. Дробаденко В. П., Кисляков В.Е., Луконина О.А. Гидротехнические сооружения при открытой геотехнологии // — Санкт-Петербург: Лань, 2019. - 304 с.
20. Дробаденко В. П., Луконина О. А. Установка для гидротранспорта твердых материалов // Патент SU 1699879, опубл. 23.12.1991.
21. Дробаденко В. П., Луконина О.А., Малухин Н.Г. Загрузочно-обменная емкость установки для гидротранспортирования сыпучих материалов // Патент RU 2 077 465 С1, опубл. 10.01.1993.
22. Дробаденко В. П., Луконина О.А., Некоз К.С., Салахов И.Н. Повышение эффективности процесса гидротранспортирования путем контроля рациональных режимов работы грунтонасосов, измеряемых гидродинамическим расходомером переменного перепада давления // Недропользование XXI век, 2021, № 5-6 (92), с. 64-69.
23. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Луконина О. А. Расширение сырьевой базы благородных металлов на основе новых гидротехнологий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2002. №1 с. 146-148.
24. Дробаденко В.П., Бутов И.И., Буянов М.И., Луконина О.А. Обоснование выбора системы оперативного контроля технологических параметров при гидромеханизированной разработке месторождений // Маркшейдерия и недропользование, 2014, № 5, с. 17-21.
25. Егоров А.И. Гидравлика напорных трубчатых систем в водопроводных очистных сооружениях. М.: Стройиздат, 1984 г. - 95 с.
26. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика: [Учебник для вузов по спец. "Гидравл. машины и средства автоматики"]. - Москва: Машиностроение, 1978. - 463 с.

27. Зелепукин Н. П., Равинский Л. М., Харин А. И. Справочник гидромеханизатора // Киев : Будівельник, 1969. - 226 с.
28. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Справочник // Под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.
29. Каменецкий В.Л., Харченко С.Л., Штин С.М., Егоров В.К. Научные и практические достижения в области гидромеханизации. Изд-во МГГУ (Москва), 2001 г. - 499 с.
30. Карасик, В. М. Основы гидравлического транспорта // В. М. Карасик, В. Н. Кондаков. - Киев: [б. и.], 1964. - 46 с.
31. Кириченко Ю.В., Гальперин А.М., Зайцев В.С., Горбатов Ю.П., Павленко В.М., Проненко А.Н., Иванов В.П., Дейнеко Ф.А. Гидромеханизированный комплекс для вскрышных работ. Патент на изобретение. Номер патента: RU 2132951 С1. Патентное ведомство: Россия. Год публикации: 1999, МГГУ.
32. Клочков Н. Н., Луконина О. А., Некоз К. С., Анализ применения технических средств для подводной добычи полезных ископаемых //// В сборнике: Новые идеи в науках о земле. Материалы XIII Международной научно-практической конференции: в 2 томах. 2017, с. 394-395.
33. Клочков Н.Н., Пятова Н.Е., Носова К.С. Оптимизация процесса гидравлического разрушения труднопромыслимых пород гидромониторными струями. В книге: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7 томах. 2019. С. 131-133.
34. Кононенко Е.А., Садыков А.А. Гидромеханизированная технология на карьере калининградского янтарного комбината. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S11. С. 105-113.

35. Контрольно-измерительные приборы для землечерпательных снарядов, ТУ ММиРФ, М., 1953 г.
36. Кремлевский П.П. Расходомеры и счётчики количества веществ: Справочник // Под общ. ред. Е.А. Шорникова. - 5. изд., перераб. и доп. - СПб.: Политехника, 2004 – 412 с.
37. Лизункин М.В., Лизункин В.М., Ситников Р.В. Исследование гидромеханического способа зачистки обогащенной рудной мелочи с почвы выработанного пространства. Инженерная физика, 2020, №11, с.54-60.
38. Лизункин М.В., Лизункин В.М., Ситников Р.В. Опыт гидромеханической зачистки обогащенной рудной мелочи. Рациональное освоение недр, 2021, №5, с.34-38.
39. Лобанов Д.П., Дробаденко В.П., Малухин Г.Н., Малухин Н.Г. Гидротранспорт продуктов скважинной гидротехнологии. Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 2. С. 129-131.
40. Лобанов Д.П., Смолдырев А.Е. Гидромеханизация геологоразведочных и горных работ. Недра, Москва, 1974 г. - 296 с.
41. Лобачев В.Г., Абрамов Н. Н. Гидравлический расчет водопроводных труб малых диаметров: (С прил. расчет. таблиц) // проф. В. Г. Лобачев и доц. - Москва; Ленинград : Госстройиздат, 1940 (Киев). - 52 с.
42. Малухин Н.Г., Дробаденко В.П., Клочков Н.Н., Тимошенко С.В. Повышение эффективности работы гидромонитора ГМД-350 при добыче янтаросодержащих глин. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 12. С. 236-241.
43. Могилина В.А. Сравнительная эффективность гидромеханизированной разработки вскрышных пород на разрезах Кузбасса. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2012, №10, с.66-67.

44. Монахов В.И. Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара. М. - Л., Госэнергоиздат, 1962 г. - 128 с.
45. "Мосейкин В.В., Харитонов М.С. Геолого-экологические и ресурсосберегающие аспекты исследований хвостохранилища «КОО предприятия Эрдэнэт». Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2020, №5, с.40-53.
46. Некоз К.С. Анализ контрольно-измерительной базы для регулирования режимов работы гидрокомплексов. В книге: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7 томах. 2019. С. 134-137.
47. Некоз К.С. Анализ метода расчёта производительности по гидросмеси расходомером переменного перепада давления с сужающим устройством. В книге: Молодые - наукам о Земле. Материалы IX Международной научно-практической конференции: в 7 томах. 2020. С. 138-142
48. Некоз К.С. Анализ методов определения расходов жидкости конструкциями переменного перепада давления с сужающим устройством. ИПКОН, 15-ая Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в 21 веке глазами молодых», 2021 г.
49. Некоз К.С. Анализ методов определения расходов жидкости конструкциями переменного перепада давления. В книге: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XV Международной научно-практической конференции: в 7 томах. 2021.
50. Некоз К.С. Оперативный контроль параметров технологии гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых. ИПКОН, 14-ая Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в 21 веке глазами молодых», 2019 г., с. 153-156.

51. Нурок Г. А. // Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ // М.: Недра, 1985. - 471 с.
52. Нурок Г. А., Лутовинов А. Г., Шерстюков А. Д. Гидроотвалы на карьерах // -М.: Недра, 1977. - 311 с.
53. Отчет о НИР «Исследование параметров комбинированной технологии добычных работ с использованием гидромеханизации». Бойцов В.Г., Демин Н.В., Грабчак Л.Г., Попов Г.Н., Шорохов С.М., В. П. Дробаденко // М., 1975 г.
54. Отчет о НИР «Совершенствование технологических процессов при добычных работах в условиях ИГОКа». Бойцов В.Г., Демин Н.В., Попов Г.Н., Шорохов С.М., В. П. Дробаденко // М., 1976 г.
55. Отчет о НИР. Изыскание технологии добычных работ и транспорта с использованием гидромеханизации в условиях ВДГМК Дробаденко В.П., Селезнев В.М., Луконина О.А.// М., 1984 г.
56. Павловский Н.Н. Гидравлический справочник. М. - Л. Госэнергоиздат, 1937 г.
57. Палишкин Н.А. Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение: Учеб. пособие для спец. "Электрификация и автоматизация сел. хоз-ва" // Н. А. Палишкин. - М : Агропромиздат, 1990. – 350.
58. Панарин В.В.
Автоматизированные системы управления в трубопроводном транспорте нефти: Учебник при профессиональном обучении рабочих на производстве. // В. В. Панарин, Л. А. Зайцев. - М.: Недра, 1986. – 254 с.
59. Пашков Н.Н. Гидравлика. Основы гидрологии: [Учебник для энерг. и энергостроит. техникумов] // Н.Н. Пашков, Ф.М. Долгачев. - Москва: Энергия, 1977. - 408 с.
60. Перспективы освоения шельфовых и глубоководных месторождений полезных ископаемых. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Луконина О.А., Козлов М.Ю. Вестник РАЕН. 2013. Т. 13. № 5. С. 99-103.

61. Петренко Ф.Ф. Гидромассомер Вентури, Труды Всесоюзного научно-исследовательского института механизации торфяной промышленности, вып 3, ГОНТИ, 1939 г.
62. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. 2-е издание, доп. Л.: "Машиностроение", 1976 г. - 504 с.
63. Подкопаев А.П. Технологические измерения и контрольно-измерительные приборы: [Учеб. по спец. N 0629 "Эксплуатация автомат. и телемех. устройств в газовой и нефт. пром-сти"] // А. П. Подкопаев. - М.: Недра, 1986. - 294 с.
64. Пособие по проектированию гидравлического транспорта (к СНиП 2 05,07—85)/Промтрансшпроект. — М.: Стройиздат, 1988. - 40 с.
65. Правила 28-64 измерения расхода жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами: Изд. офиц. // Гос. ком. стандартов, мер и измерит. приборов СССР. - Москва: Изд-во стандартов, 1964. - 148 с.
66. Рабинович Е.З. Гидравлика: [Учеб. для техникумов] // Е. З. Рабинович, А. Е. Евгеньев. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Недра, 1987. – 224 с.
67. РД 50-213-80 Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. Изд. офиц. // Гос. ком. стандартов, мер и измерит. приборов СССР. - Москва: Изд-во стандартов, 1982. - 320 с.
68. Релин А.Б. Создание и эксплуатация современных систем автоматического контроля производительности земснарядов на горных работах. Москва, Центральное правление научно-технического горного общества, 1984 г.
69. Релин А.Б., «Системы автоматического контроля технологических параметров землесосных параметров землесосных снарядов». М., Стройиздат, 1986 г.

70. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Производственные процессы. Изд-во «Книжный дом ЛИБРОКОМ», 2010 г. - 512 с.
71. Садыков А.А. Параметры процесса гидромониторного размыва, исключаяющие дробление янтаря на карьере калининградского янтарного комбината. Недропользование XXI век. 2019. № 4 (80). С. 70-75.
72. Санников С.П., Бондюгова М.С. Исследование расходомеров и счетчиков количества жидкости. УГЛТУ, Екатеринбург, 2013 г.
73. Силин Н. А., Пищенко И. А., Диминский К. В. Приборы для измерения параметров гидротранспортирования твердых материалов // Акад. наук УССР. Институт гидрологии и гидротехники. Киев: Изд-во Акад. наук УССР, 1963 - 198 с.
74. Силин Н.А. Гидротранспорт угля по трубам и методы его расчета // Н. А. Силин, Ю. К. Витошкин; Акад. наук УССР. Ин-т гидрологии и гидротехники. - Киев: Изд-во Акад. наук УССР, 1964 г.
75. Силин, Н.А. Режим работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов // Н. А. Силин, С. Г. Коберник; Акад. наук УССР. Ин-т гидрологии и гидротехники. - Киев: Изд-во Акад. наук УССР, 1962. - 215 с.
76. Слепой Ю.Ш. Автоматическое управление в гидромеханизации открытых горных работ. М.: "Недра", 1966 г.
77. Смолдырев А.Е., Сафонов Ю. К. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей // Москва: Машиностроение, 1973. - 208 с.
78. Спиваковский А. О., Смолдырев А. Е., Зубакин Ю. С. Автоматизация трубопроводного транспорта // -М.: Недра, 1972. - 342 с.
79. Справочник по гидравлическим расчетам. Под редакцией Киселева П.Г. Изд. 4-е, переработанное и допоолненное. М.: Изд. "Энергия", 1972 г. - 312 с.

80. Тарасьянц С.А., Ширяев В.Н., Уржумова Ю.С., Михеев А.В. Методика расчета струйных аппаратов, используемых в гидромеханизации // Экология и водное хозяйство. 2021. Т. 3. № 2. С. 113-123.
81. Технические средства контроля в системах управления технологическими процессами: учебное пособие / сост. А.Р. Герке [и др.]; Казан. гос. технол. ун-т. – Казань. 2007. – 80 с.
82. Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Гроссу А.Н. Исследование на имитационной модели процессов размыва и всасывания железной руды в очистном затопленном пространстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № S19. С. 3-14.
83. Филиппова Д.А. Баланс сточных вод при перегрузке песка гидромеханизированным способом. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2014, № 2 (24), с. 151-155.
84. Харин А. И., Новиков М. Ф. Гидромеханизация земляных работ в строительстве // - М.: Стройиздат, 1989. -191 с.
85. Хныкин В.Ф. Гидравлическая разработка россыпных месторождений. М.: МГРИ, 1988 г.
86. Чебан А.Ю. Гидромеханизированная добыча строительных горных пород в бассейне реки Амур. Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2016, №2, с. 73-78.
87. Чебан А.Ю. Комплекс для перегрузки насыпных строительных материалов в средства водного транспорта. Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2015, №5, с. 43-47.
88. Чейшвили В.А. Измерение расхода жидкости соплами Вентури // Проектирование, расчет, нормали и техн. указания на изготовление и

монтаж сопел Вентури // В. Л. Чейшвили, канд. техн. наук; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидротехн. и сан.-техн. работ ВНИИГС. - Ленинград: [б. и.], 1959. - 65 с.

89. Шкундин Б. М. Землесосные снаряды. Учеб. пособие для гидротехн. специальностей вузов. - 2-е изд., перераб. // Москва: Энергия, 1973. - 271 с.
90. Шорохов С.М. Разработка россыпных месторождений и основы проектирования. Учебник для специальности «Разработка россыпных месторождений» горных вузов и факультетов. Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу (Госгортехиздат), 1963 г.
91. Юфин А.П. Гидромеханизация. Учебник для гидротехн. специальностей вузов. - Москва: Стройиздат, 1965. - 496 с.
92. Яковлева Л.В. Практикум по гидравлике: [Для с.-х. техникумов по спец. 3110 "Гидромелиорация", 2203 "Эксплуатация автоматизир. систем"] // Л. В. Яковлева. - М.: Агропромиздат, 1990. – 141 с.
93. Ялтанец И. М. Виды горных и строительных работ, выполняемых средствами гидромеханизации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. №10 с. 26-36.
94. Ялтанец М. И. Справочник по гидромеханизации // - М.: Горная книга, 2011. - 736 с.