

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)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2022

Работа выполнена на кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

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

Официальные оппоненты: **Лизункин Михаил Владимирович**, доктор технических наук, профессор, доцент кафедры подземной разработки месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО Забайкальский государственный университет

Протасов Сергей Иванович, кандидат технических наук, профессор кафедры "Открытые горные работы" ФГБОУ ВО Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

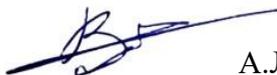
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Защита состоится «15» сентября 2022 г. в 11:15 на заседании диссертационного совета Д212.121.09 в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23 в аудитории 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе и на сайте: [Diss NekoKS.pdf \(mgri.ru\)](#)

Автореферат разослан: «18» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



А.Л. Вильмис

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Обобщение опыта и проведенный анализ гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых в различных отраслях промышленности показывает, что на горнодобывающих предприятиях либо отсутствует систематический контроль основных параметров гидротранспортирования - расхода и плотности гидросмеси, определяющих часовую производительность грунтонасоса по горной массе, либо осуществляется эпизодически. Это не позволяет регулировать текущие режимы технологического процесса и, как следствие, повысить эффективность работы всего гидрокомплекса.

Проведенный анализ различной контрольно-измерительной аппаратуры: расходомеров (электромагнитных, ультразвуковых, доплеровских, дискретно-непрерывного вероятностного метода и др.), а также плотномеров и консистомеров (радиоактивных, диэлькометрических, кондуктометрических и др.) различных конструкций 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 тарировочной поверки приборов из-за колебаний электрофизических свойств перекачиваемых гидросмесей, различных по своим характеристикам. Сложность, а нередко и невозможность использования большинства такой аппаратуры, дополняются трудностью их монтажа в условиях работы передвижных гидрокомплексов, продвигающихся вместе с фронтом горных работ, а также необходимостью обслуживания указанной контрольно-измерительной аппаратуры высококвалифицированным персоналом, в т.ч. в отдаленных горно-технических условиях разработки.

На практике при гидротранспортировании обычно применяют расходомеры, в которых используется метод переменного перепада давления, конструктивно характеризующийся различными сечениями определенного размера участка трубы. В них при отборе давления в транспортном трубопроводе и сужающем устройстве фиксируются местные гидравлические сопротивления в виде потери давления, которые функционально связаны с расходом гидросмеси.

Из всех сужающих измерительных устройств (диафрагма, сопло и др.) наиболее распространенным является расходомер типа трубы Вентури. При всех его преимуществах: определение мгновенного и суммарного расхода, простоты изготовления и монтажа, отсутствия дополнительной тарировки, при эксплуатации калибровочное сужающее устройство подвергается сравнительно быстрому истиранию. Поэтому при ее использовании обычно рекомендуется монтировать разъемные вкладыши из специальной стали, что требует определенных эксплуатационных затрат.

Более совершенным в гидродинамическом отношении является расходомер переменного перепада давления типа «трубы Антивентури». В нем обеспечивается минимальное (либо полное отсутствие) влияние характеристик транспортируемой среды без непосредственного контакта с измерительными элементами. В итоге, гидродинамический расходомер с расширяющим устройством предлагается включить в комплекс основных измерительных узлов системы оперативного управления режимами работы гидротранспортной установки, создание и апробация которой является актуальной проблемой для повышения эффективности гидромеханизированной разработки месторождений 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 комплексом измерительных устройств переменного перепада давления - расходомером с расширяющим устройством типа трубы «Антивентури» и гидростатическим плотномером гидросмеси, а также автоматическим учётом фактического времени работы другого аппаратного обеспечения, параметры которых контролируются и регулируются на пульте управления в кабине гидромониторщика.

Задачи исследований:

– проанализировать опыт гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых, а также способов и технических средств измерения параметров гидротранспортирования.

– определить методы расчета жидкости измерительными устройствами переменного перепада давлений в трубах с изменяющимися сечениями.

– обосновать использование гидродинамического расходомера переменного перепада давлений с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури» для измерения производительности гидрокомплекса по гидросмеси.

– проанализировать различные методы расчета местных гидравлических сопротивлений (потерь давления) в трубах с изменяющимися сечениями.

– 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.

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 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. 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 состоит в обобщении практического опыта гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых в различных отраслях промышленности; анализе измерительных устройств, предназначенных для определения параметров гидротранспортирования твердых материалов; анализе конструктивных особенностей и гидродинамических аспектов расходомера переменного перепада давления; аналитических

исследованиях потерь давления по различным методам расчета в трубах с переменным сечением; обработке и интерпретации результатов исследований по промышленному тестированию расходомера переменного перепада давлений.

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 (~ в 6 раз), чем при степени расширения n (~ в 2 раза); оптимальными значениями являются $\alpha=5\div7^\circ$ при соответствующих длинах диффузора $l_d=1,2\div1,45$ м.

Практическая значимость 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 133 страницах текста и состоит из введения, пяти 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится общая характеристика диссертационной работы, ее актуальность, обозначаются цель, идея, задачи, а также излагаются защищаемые научные положения, научная новизна и практическая значимость исследований, приводятся сведения об апробации результатов работы и публикационной активности автора.

В первой главе проведен обзор современного опыта гидромеханизированных открытых горных работ на предприятиях Лебединского железорудного месторождения КМА, КОО "Предприятие Эрдэнэт", при разработке россыпных месторождений и карьеров стройматериалов в условиях Крайнего Севера на примере Верхне-Днепровского горно-обогатительного комбината, а также применение гидромеханизированного способа при производстве земляных работ. Проведен анализ контрольно-измерительной аппаратуры: расходомеров (электромагнитных, ультразвуковых, переменного перепада давлений) и плотномеров и консистометров (весового, гидростатического, ультразвукового, радиоактивного, основанного на измерении электропроводности гидромеси и дизелькометрического).

Во второй главе проведен анализ контрольно-измерительной устройств, основанных на принципе переменного перепада давления (диафрагма, сопло и труба Вентури), проанализированы методы расчета расходомера с сужающим устройством типа трубы Вентури различных ученых: института

гидрологии и гидротехники Академии наук Украины, Идельчика И.Е., Альтшуля А.Д., Равинского Л. М., Зелепукина Н. П., Рабиновича Е.З., Чейшвили В.А., Юфина А.П., Панарина В.В., Шкундина Б. М. и Нурока Г.А., Подкопаева А.П., а также влияние гидродинамических факторов на местные гидравлические сопротивления, возникающие при изменении сечения трубопровода.

В третьей главе проведен анализ гидродинамического расходомера с расширяющим устройством типа «трубы Антивентури», установлено уравнение его производительности, а также аналитическим путем определены зависимости длины диффузора от угла расширения α для различных типоразмеров расходомеров со степенью расширения n от 1,74 до 2,87.

В четвертой главе рассматриваются технологические аспекты опытно-промышленных исследований на Иршинском ГОКе. Основным базовым измерительным полигоном являлся карьер экскаваторно-гидравлических работ. (рис. 1).



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

Апробация расходомера «труба Антивентури» также проводилась на Верхне-Днепровском ГМК, прииске "Экспериментальный" Сусуманского ГОКа. Приводятся особенности и результаты тарировочных испытаний расходомеров переменного перепада давления типов труб Вентури, «Антивентури», диафрагмы ДК-25-450, на промышленном трубопроводе с внутренним диаметром 410 мм, и на их основе устанавливаются коэффициенты расходов для каждого типа данных измерительных устройств.(рис.2)

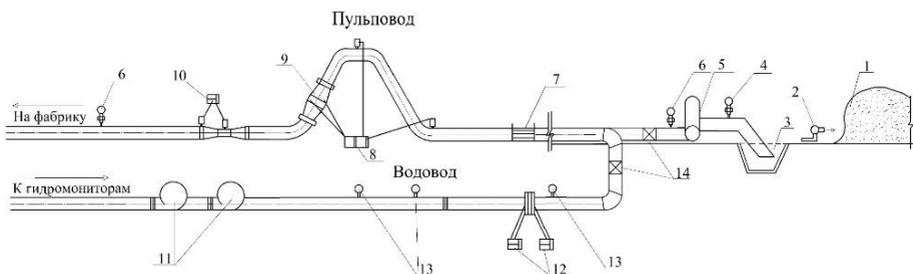


Рис. 2. Измерительная схема параметров гидротранспортирования при проведении опытно-промышленных тарировочных испытаний на ИГОКе.

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.

Пятая глава посвящена реализации эргономических факторов при внедрении системы оперативного управления гидродобычей карьера, а также ее составляющих – новой конструкции кабины гидромониторщика с пультом управления основными технологическими процессами.

В заключении отражены основные выводы и рекомендации, обобщающие положения диссертационной работы.

Первое защищаемое научное положение.

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).

Труба Вентури включает сужающее устройство, вмонтированное в трубопровод, в котором скорость потока возрастает, а статическое давление становится меньше, чем перед сужением (рис. 3).

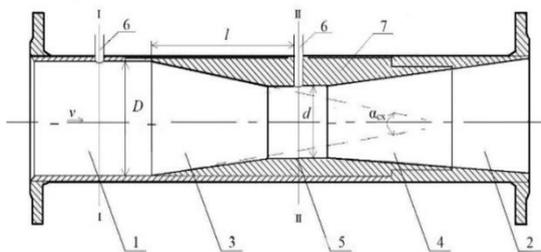


Рис. 3. Конструктивная схема расходомера гидросмеси трубы Вентури. 1 – входной участок, 2 – выходной участок, 3 – конфузор, 4 – диффузор, 5 – горловина, 6 – место отбора давления, 7 – вставка из твердых сплавов (институт Гипроуглеавтоматизации).

Разность этих давлений является функцией расхода движущейся гидросмеси, и измеряется дифференциальными

манометрами, что позволяет в результате использования уравнений непрерывности и Бернулли интерпретировать её в расход жидкости.

Основная зависимость расхода Q транспортирующей жидкости от перепада давлений определяется соотношением, предложенным сотрудниками ИГМ АН УССР:

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

где μ - коэффициент расхода; ω_1 и ω_2 - площади поперечного сечения трубопровода и горловины, м²; $\rho_{\text{раб}}$ - плотность рабочей жидкости, кг/м³; ρ_B - плотность воды, кг/м³; Δh - потери напора между сечениями I-I и II-II (рис. 3).

Аналогичные в структуре уравнения для определения расхода гидросмеси приводят в своих работах Нурок Г.А., Юфин А.П., Шкундин Б. М., Спиваковский А.О., Смолдырев А.Е., Дживаршейшвили А.Г., Зубакин Ю.С., Карасик В.М., Лобачев В.Г., Чейшвили В.А. и др.

Однако, методический подход при этом не учитывает конкретно *местные сопротивления*, возникающие с изменением сечения трубопровода при течении жидкости, а все факторы, связанные с ними и 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} , предлагает объединить в коэффициент расхода.

При этом многие из них априори считают его значения равными 0,92-0,98 или рекомендуют определять экспериментальным путем.

Таким образом, для определения значений коэффициента расхода μ нами было проведено опытно-промышленное тестирование на трубопроводе с внутренним диаметром 410 мм расходомера с размерами 410/306 мм и коэффициентом расхода $\mu=0,975$ при наработке 650 часов.

Основным поверочным измерительным устройством тарировочных показаний расходомера являлся электромагнитный расходомер типа "Индукция-51", с классом точности 1,5% и пределом измерения расхода 2500 м³/ч.

Исследования проводились в двух режимах: при подаче воды по трубопроводу с использованием дополнительного измерения её расхода камерной диафрагмой ДК-25-450, а также при гидротранспортировании пульпы с объемной концентрацией от ~10% до ~20%, измеряемой гидростатическим плотномером с шаровым датчиком К. В. Диминского (рис. 7). При этом были реально установлены коэффициенты расхода по воде 0,975 (труба Вентури типоразмера 410/306 мм) и 0,96 (диафрагма ДК-25-450) (рис. 8, 9).

Было отмечено, что для точности измерения расхода жидкости большое значение имеет постоянство проходного сечения трубы Вентури, которая подвергается абразивному износу в процессе ее эксплуатации (наработка ~650 часов).

При эксплуатации его в течение этого времени определены наиболее изнашиваемые элементы измерительного нестандартного устройства и калибровочной (суженной) вставки 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.

Второе защищаемое научное положение.

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.

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.

В дальнейшем, его конструкция была видоизменена, так как функциональным назначением его являлось измерение расхода гидросмеси, которое отличалось следующими признаками:

- 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.

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, 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).

Расходомер с расширяющим устройством конструируется аналогично трубе Вентури, чтобы разность давлений образовывалась в двух смежных, близко отстоящих друг от друга, сечениях. Однако, в отличие от нее, в расширяющей (диффузорной) части расходомера «Антивентури» твердые

частицы движутся со скоростями, значительно уменьшающими износ устройства, что повышает срок его эксплуатации. Перепад давлений также измеряется первичным датчиком – дифференциальным манометром различных типов с передачей сигнала на шкалу вторичного самопишущего прибора.

На рис. 4, 5, 6 показано профильное трубопроводное устройство, на котором смонтировано нестандартное оборудование расходомера и плотномера с регистрирующей измерительной аппаратурой.

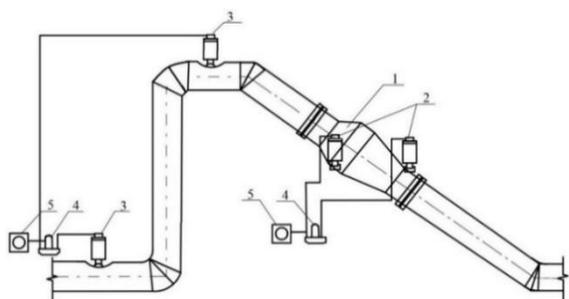


Рис. 4. Принципиальная схема расположения контрольно-измерительных нестандартных устройств с аппаратурой для определения режима работы гидрокомплекса. 1 – гидродинамический расходомер типа «труба Антивентури», установленный на пульповоде; 2 – отборники давления; 3 – отборник давления с шаровым датчиком гидростатического плотномера; 4 – первичные приборы ДМ-3537; 5 – вторичные самопишущие приборы КСД-2.

расходомер типа «труба Антивентури», установленный на пульповоде; 2 – отборники давления; 3 – отборник давления с шаровым датчиком гидростатического плотномера; 4 – первичные приборы ДМ-3537; 5 – вторичные самопишущие приборы КСД-2.

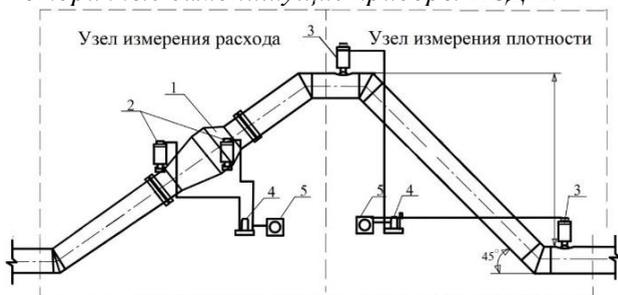


Рис. 5. Измерительная система определения расхода и плотности гидросмеси. 1 – гидродинамический расходомер (труба «Антивентури»); 2 – отборники давления с эластичным разделителем; 3 – плотномер с шаровым датчиком К.В. Диминского; 4 – первичные приборы ДМ-3537; 5 – вторичные самопишущие приборы КСД-2.

эластичным разделителем; 3 – плотномер с шаровым датчиком К.В. Диминского; 4 – первичные приборы ДМ-3537; 5 – вторичные самопишущие приборы КСД-2.



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

Теоретические основы определения расхода гидросмеси в литературе рассматриваются в основном для труб Вентури. Учитывая, что рассмотренные измерительные системы по принципу действия являются устройствами переменного перепада давления, для оценки и обоснования расчетной производительности гидродинамического расходомера нами был принят приведенный аналогичный методический подход, основанный на совместном решении уравнений неразрывности и Бернулли. Исходя из этого, пропускная способность транспортирования гидросмеси определяется по уравнению:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p}{\rho \left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1} + \Delta H}, \quad (3)$$

где d – диаметр трубопровода, мм; D – диаметр расширенной части расходомера, мм; ρ – плотность жидкости, кг/м³; Δp – перепад давления, м.вод.ст.; ΔH – потерянная часть

давления, идущая на преодоление общего сопротивления измерительного участка трубопровода.

Все параметры, входящие в уравнение (3), за исключением Δp и ΔH , и зависящие от конструктивных особенностей обозначим через параметр K , равный

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

В итоге, с учетом потерь давлений ΔH , возникающих в измерительном участке, уравнение для определения производительности гидродинамического расходомера с расширяющим устройством будет иметь вид:

$$Q = K \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} + \Delta H. \quad (5)$$

Установленное уравнение не учитывает конкретные значения потерь давления в расходомере, то есть расход (производительность) по гидросмеси, рассчитанный по нему будет завышенным – теоретическим. Поэтому для определения действительного его значения введен поправочный коэффициент - коэффициент расхода μ , который устанавливался по результатам тарировочных опытно-промышленных исследований.

Расчетные значения расходов воды (гидросмеси) по уравнению 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 (рис. 2). В интервалах времени измерений по 20-30 минут каждый и по различиям в показаниях устройств устанавливали коэффициенты расхода μ для каждого из них.

Второй режим тарировочных испытаний производился при гидротранспортировании пульпы с объемной концентрацией ~10% и ~20%, измеряемой гидростатическим плотномером с

шаровым датчиком К. В. Диминского (рис. 7). Значения плотности гидросмеси регулярно контролировались объемно-весовым способом с тарировочной ёмкостью объемом 100 л, установленной на весах.

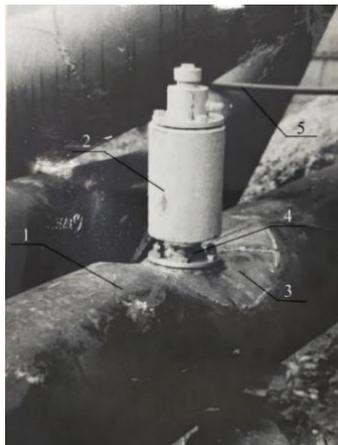


Рис. 7. Шаровой датчик и разделитель с эластичной диафрагмой плотномера (ИГОК). 1 – пульповод Ду=400 мм; 2 – разделитель; 3 – посадочное место; 4 – шар; 5 – импульсные трубки.

Таким образом, были определены значения коэффициентов расходов, которые сопоставлены с расчетными показателями (рис. 8,9).

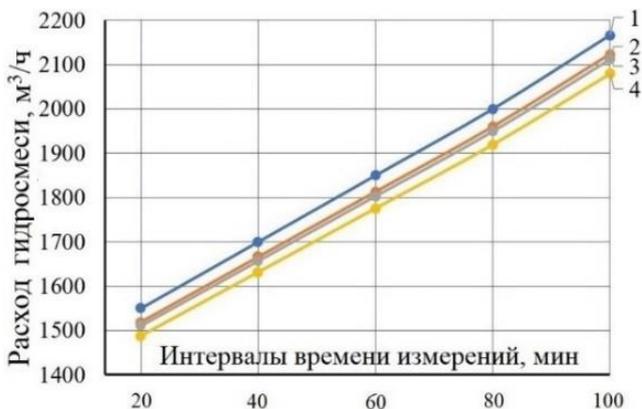


Рис. 8. Результаты промышленных тарировочных измерений расхода воды во времени. 1 – Индукция-51; 2 – расходомер с расширяющим устройством (труба «Антивентури»); 3 – расходомер с сужающим устройством (труба Вентури); 4 – диафрагма ДК-25-450.

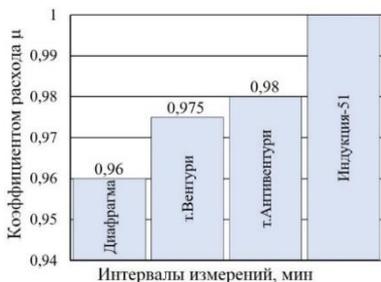


Рис. 9. Гистограмма значения коэффициентов расхода μ по воде различных испытываемых расходомеров.

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, пропускная способность транспортирования гидросмеси «трубы Антивентури» определяется по следующему уравнению:

$$Q = 0,98 \cdot K \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}. \quad (6)$$

Третье защищаемое научное положение.

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 они возрастают многократно (~ в 6 раз), чем при степени расширения n (~ в 2 раза); оптимальными значениями являются $\alpha = 5 \div 7^\circ$ при соответствующих длинах диффузора $l_d = 1,2 \div 1,45$ м.

Местные гидравлические сопротивления в расширяющейся (диффузорной) части расходомера в основном зависят от основных геометрических характеристик диффузора: угла расширения α , степени расширения $n = S_1/S_2$ (где S_1 и S_2 - соответственно площади сечения расширенной и суженной частей), а также длины диффузора l_d .

Кроме того, потери энергии 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 (рис. 10).

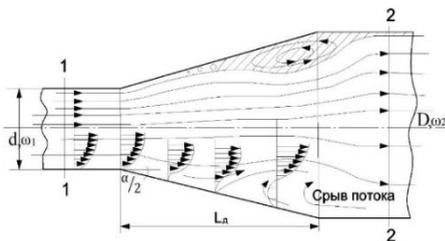


Рис. 10. Схематическая картина отрыва потока при наличии положительного градиента давления в диффузоре по И.Е. Идельчику.

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 сечения трубопровода, 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. Поэтому образуется несимметричность, которая выражается в неустойчивости режима движения жидкости, увеличении её пульсаций, периодическими срывами и появлению возвратных струй.

Взаимосвязь основных геометрических параметров гидродинамического расходомера можно установить по уравнению И.Е. Идельчика:

$$\frac{l_d}{D_0} = \frac{n - 1}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (7)$$

где n - степень расширения; D_0 - диаметр расширенной части расходомера, мм; α - угол расширения, °; l_d - длина диффузора, м.

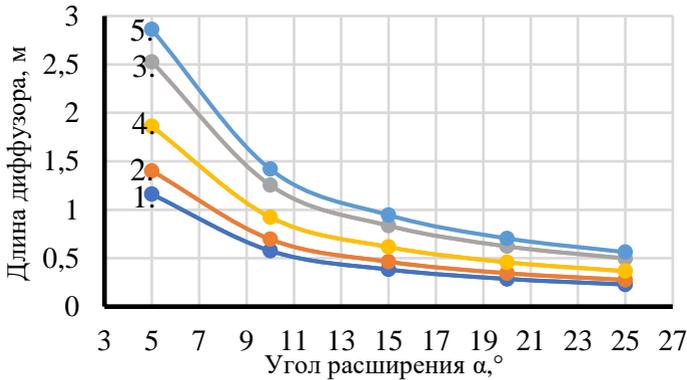


Рис. 11. Зависимости длины диффузора от угла расширения α для различных типовых размеров расходомеров. 1 – $D/d=418/317$ мм ($n=1,74$; $Q=2200$ м³/ч); 2 – $D/d=473/351$ мм ($n=1,81$; $Q=2700$ м³/ч); 3 – $D/d=800/580$ мм ($n=1,9$; $Q=5800$ м³/ч); 4 – $D/d=510/348$ мм ($n=2,15$; $Q=2500$ м³/ч); 5 – $D/d=608/359$ мм ($n=2,87$; $Q=2500$ м³/ч).

Как видно из рис. 11, 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: $\alpha=5 \div 7^\circ$ при $l_d=0,8 \div 2,8$ м.

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 $\Delta H_{\text{тр}}$, возникают дополнительные потери давления из-за расширения поперечного сечения трубопровода $\Delta H_{\text{расш}}$. Поэтому общие потери в диффузоре $\Delta H_{\text{д}}$ могут быть выражены в виде суммы:

$$\Delta H_{\text{д}} = \Delta H_{\text{тр}} + \Delta H_{\text{расш}} \quad (8)$$

где $\Delta H_{\text{тр}}$ – потери на трение, м.вод.ст., $\Delta H_{\text{расш}}$ – потери давления из-за расширения поперечного сечения трубопровода, м.вод.ст.

Таким образом, общие потери давления можно представить в виде:

$$\Delta p = \zeta_{\text{тр}} + \varphi_{\text{расш}} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \quad (9)$$

где $\varphi_{\text{расш}}$ – коэффициент полноты удара диффузора, равный:

$$\varphi_{\text{расш}} = 3,2k(\text{tg } \alpha/2)^{1,25} = 3,2k \text{tg}(\alpha/2)^4 \sqrt{\text{tg}(\alpha/2)} \quad (10)$$

где k – коэффициент равномерности движения потока.

Коэффициент потерь на трение можно определить по уравнению:

$$\zeta_{\text{тр.}} = \frac{\lambda}{8 \sin \alpha/2} \frac{n^2 - 1}{n^2} \quad (11)$$

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

Однако расчетные 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, при этом общие потери энергии определяются зависимостями, представленными на рис. 12 и 13:

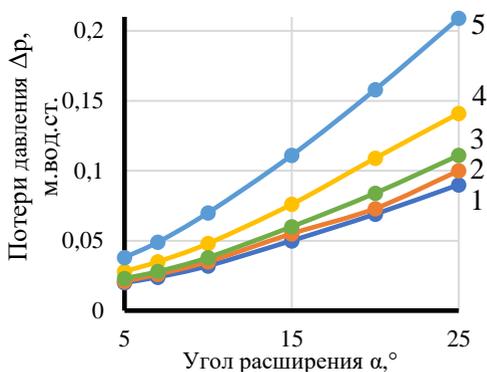


Рис. 12. Зависимости перепада давления Δp от угла расширения α , расхода Q , степени расширения n . 1 – $D/d=418/317$ мм ($n=1,74$); 2 – $D/d=473/351$ мм ($n=1,81$); 3 – $D/d=800/580$ мм ($n=1,9$); 4 – $D/d=510/348$ мм ($n=2,15$); 5 – $D/d=608/359$ мм ($n=2,87$).

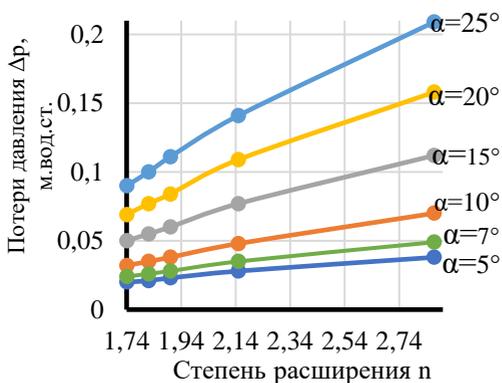


Рис. 13. Зависимости потерь давления Δp от степени расширения n при различных расходах жидкости. 1 – $Q=2237$ м³/ч ($n=1,74$); 2 – $Q=2688$ м³/ч ($n=1,82$); 3 – $Q=5762$ м³/ч ($n=1,9$); 4 – $Q=2493$ м³/ч ($n=2,15$); 5 – $Q=2505$ м³/ч ($n=2,87$).

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, хотя сами потери имеют высокие значения.

Результаты аналитических исследований, по представленному методу расчета функциональной зависимости $\Delta p=f(n, \alpha, l_0)$ диффузора гидродинамического расходомера, позволили составить номограмму (рис. 14) для определения его геометрических параметров с соотношением площадей поперечных сечений расширенной части диаметрами D и трубопровода – d , представленных ниже: $D/d = 418/317$ мм ($n = 1,74$); $D/d = 473/351$ мм ($n = 1,82$); $D/d = 473/348$ мм ($n =$

2,15); $D/d = 608/359$ мм ($n = 2,87$) с расходами гидросмеси Q при изменении их значений от $2200 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $2700 \text{ м}^3/\text{ч}$, а также для $D/d = 800/580$ мм ($n = 1,9$) с расходом $Q \approx 5700 \text{ м}^3/\text{ч}$.

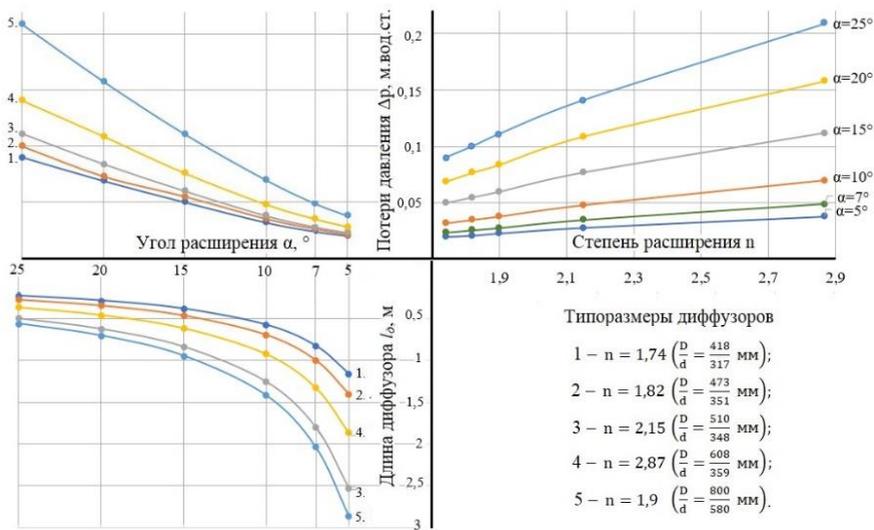


Рис. 14. Номограмма для определения основных параметрических величин гидродинамического расходомера переменного перепада давления типа «трубы Антивентури».

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.

Потери давления, рассчитанные по методикам различных авторов (И.Е. Идельчик, Е.З. Рабинович, А.Д. Альтшуль, Б.Т. Емцев), имеют значительные величины, 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 (табл. 1).

Таблица 1

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. | $\Delta p = \varphi \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2$ | 0,018 | 0,02 | 0,022 | 0,028 | 0,041 |
| 2. | Идельчик И.Е. | $p = \zeta_{тр} + \varphi \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2$ | 0,024 | 0,026 | 0,028 | 0,035 | 0,049 |
| 3. | Рабинович Е.З. | $p = \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 \cdot \sin \alpha$ | 0,022 | 0,025 | 0,027 | 0,035 | 0,052 |
| 4. | Рабинович Е.З. | $p = \zeta_{тр} + \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 \cdot \sin \alpha$ | 0,025 | 0,028 | 0,03 | 0,038 | 0,056 |
| 5. | Альтшуль А.Д. | $\Delta p = k \cdot (n-1)^2$ | 0,067 | 0,081 | 0,099 | 0,161 | 0,425 |
| 6. | Альтшуль А.Д. | $\Delta p = k \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2}{2}$ | 0,816 | 0,876 | 0,941 | 1,085 | 1,46 |
| 7. | Емцев Б.Т. | $\Delta p = \varphi \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2}{2g}$ | 0,80 | 0,86 | 0,93 | 1,09 | 1,44 |
| 8. | Вейсбах Ю. | $\Delta p = \sin \alpha \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2}{2}$ | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,32 | 0,62 |

Результаты апробации и внедрения системы оперативного управления гидродобычей карьера экскаваторно-гидравлических работ выражаются в тесной взаимосвязи с эргономическими факторами, присущими взаимодействию деятельности человека с элементами оптимизации производительности технологического процесса, который заключался 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 (рис. 15, 16).



Рис. 15. Общий вид кабины гидромониторщика. 1 – кабина; 2 – задвижка; 3 – водовод; 4 – гидромонитор ГМД-250.



Рис. 16. Вид из кабины гидромониторщика с пультом управления. 1 – кнопки регулирования технологическими режимами гидромониторно-грунтососной установки комплекса; 2 – рычаги управления гидромонитором.

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-грунтососной 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» (рис. 17).



Рис. 17. Передвижная установка измерения параметров гидротранспортирования на расстояние до 2 км из карьера на обогатительную фабрику.

Актуальным для предприятия являлось решение таких производственных задач, как организовать оперативный контроль объемов ильменитосодержащих пород, подаваемых на обогатительную фабрику; исключить длительную малопроизводительную работу оборудования; повысить полноту извлечения полезного компонента за счет стабильной подачи гидросмеси из карьера на обогатительную фабрику; своевременно принимать меры при опасности возникновения аварийных ситуаций, повысить производительность труда; снизить себестоимость конечной продукции.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

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. Обосновано, что более целесообразным для гидромеханизированной разработки месторождений полезных ископаемых является применение приборов переменного перепада давления, отличающиеся простотой конструкции и монтажа, не требующие тарировочных поверок, возможностью изготовления нестандартного оборудования в условиях отдаленных месторождений, с достаточной для горных предприятий точностью и надежностью измерений.

3. Приведено 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) расходомера «трубы Антивентури» от ее геометрических параметров 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. 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 гидросмесьях с концентрацией 10÷20%, значения последних двух снижаются до 0,91 и 0,92.

7. Создание системы оперативного управления гидродобычей комплекса «карьер-обогажительная 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.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Повышение эффективности процесса гидротранспортирования путем контроля рациональных режимов работы грунтонасосов, измеряемых гидродинамическим расходомером переменного перепада давления. Дробаденко В.П., Луконина О.А., Некоз К.С., Салахов И.Н. Недропользование XXI век. 2021. № 5-6 (92). С. 64-69.

2. Оценка гидродинамических параметров технологии подземного выщелачивания руд. Вильмис А.Л., Маркелов С.В., Луконина О.А., Некоз К.С. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 3-1. С. 299-306.

В других изданиях:

3. 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.

4. 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.

5. Оптимизация процесса гидравлического разрушения труднопромывистых пород гидромониторными струями Ключков Н.Н., Пятова Н.Е., Носова К.С. В книге: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7 томах. 2019. С. 131-133.

6. 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.

7. 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.

8. 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.