

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
1. Вводные сведения	5
1.1. Предмет изучения	5
1.2. Область и перспективы применения	6
1.3. Краткий очерк развития	12
1.4. Некоторые сведения из гидравлики	14
2. Движение твердой частицы в потоке жидкости	22
2.1. Воздействие потока на частицу	22
2.2. Скорость трогания	22
2.3. Скорости свободного и стесненного падения	24
2.4. О механизме взвешивания и переноса частиц	29
3. Гидросмеси горной массы	30
3.1. Виды гидросмесей и их характеристики	30
3.2. Физико-механические свойства гидросмесей	33
4. Общая характеристика движения гидросмесей в трубах	44
4.1. Основные виды движения гидросмесей	44
4.2. Режимы движения гидросмесей. Практические задачи гидротранспорта	45
4.3. Интегральные характеристики движения гидросмесей. Экспериментальная база. Результаты исследований	50
5. Гидравлическая модель потока гидросмеси	56
5.1. Общие положения	56
5.2. Способы построения математических моделей	63
5.3. Краткий обзор основных математических моделей	64
5.4. Основы общей гидравлической модели течения гидросмесей	72
5.5. Некоторые соображения о расходной и действительной концентрациях гидросмеси	88
6. Механизм воздействия частиц на твердые границы потока гидросмеси	89
6.1. Постановка задачи	89
6.2. Износ пульповода при ударе частиц	91
6.3. Ударный износ пульповода с учетом вероятностного фактора	92
7. Условия экономичности применения рудничного гидротранспорта минерального сырья	95
7.1. Общие положения	95
7.2. Оценка экономической эффективности гидротранспорта как основы гидротранспортной технологии	98
7.3. Методология выбора, построения, оптимизации технологических схем гидротранспорта	100
8. Технология и оборудование рудничного гидротранспорта	108
8.1. Общие сведения	108
8.2. Основное оборудование гидромеханизации: характеристики, расчетные зависимости	121
8.3. Перспективы рационального использования технологии гидротранспортирования для конкретных рудников	164
Заключение	181
Приложение 1	184
Приложение 2	186
Литература	189

Предисловие

В основе учебного пособия лежат многолетние исследования автора процессов гидравлического транспортирования горной массы, получаемой при разрушении горных пород в различных технологиях геолого-разведочного и горного производства. При этом учитывается особая потребность в систематическом изложении знаний в данной области применительно к направлениям подготовки (специальностям; специализациям): «Технология и техника разведки МПИ», «Физические процессы горного производства», «Транспортно-технологические комплексы», «Горнотранспортное оборудование» и др. Для этих специализаций характерны широкий охват горно-геологических и производственных условий применения гидравлического транспорта при решении технологических задач.

В различных технологиях геологической разведки, добычи и переработки твердых полезных ископаемых и их промпродуктов гидротранспортом перемещают горные массы крупностью кусков до 50—100 мм на расстояния 1—3 км, мелкозернистые материалы (пески) — до 5—10 км и мелкодисперсные промпродукты на расстояния в сотни километров.

В системах гидротранспорта и гидроподъема реализуются давления до 10—20 МПа, скорости потоков порядка 1,5—5 м/с и расходы, определяемые размерами (диаметрами) пульпопроводов 50—850 мм. Содержание твердой компоненты в гидросмесьях в различных технологиях обычно изменяются в пределах от 10 до 60% по весу. Широко применяют транспортирование полидисперсных и высокоплотных гидросмесей (с содержанием твердой компоненты до 80% по весу), буровых промывочных жидкостей с гидротранспортом керна (шлама), цементных растворов и др.

За последние 20 лет объемы применения данного вида транспорта в мировой практике увеличились на порядок, причем на долю минерально-сырьевой отрасли и химической промышленности приходится около 60% объёмов.

Гидравлическое транспортирование горной массы осуществляют напорными (по трубам) и безнапорными потоками (по желобам, канавам). В первом случае перемещение груза происходит за счет энергии давления (напора), а во втором — за счёт уклона, создаваемого между пунктами его загрузки и разгрузки. Отличие транспортных систем состоит в области их исполнения и применяемом оборудовании. Движение потоков подчиняется единым закономерностям. Поэтому, например, расчеты требуемого уклона и других параметров для безнапорных гидротранспортных систем могут выполняться по формулам напорного гидротранспорта с определенными поправками и допущениями.

Для осуществления гидравлического транспортирования используется широкий набор оборудования и технологий. В учебном пособии представлено описание технологических схем гидротранспортирования, конструктивных особенностей и параметров некоторых видов оборудования. При подготовке рукописи автором использованы результаты работ ряда отечественных и зарубежных исследователей.

Основную задачу учебного пособия автор видит в изложении гидравлических закономерностей движения горной массы напорными потоками, в разработке методологии расчёта гидравлических и технологических параметров транспортных систем.

1. ВВОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Предмет изучения

Предмет изучения настоящей дисциплины состоит в получении знаний в области:

- взаимодействия потока жидкости с горной массой, представленной определенной крупностью, плотностью, насыпным весом и другими физическими параметрами;

- образования гидросмесей в зависимости от фракционного состава горной массы;

- формирования непрерывного потока смеси с различными кинематическими характеристиками (распределением скоростей движения и концентрации) в поперечном сечении потока;

- гидравлического механизма перемещения твердой компоненты смеси, представленной различными классами крупности и плотности;

- разрушающей способности потоков в связи с гидроабразивным и коррозионным воздействиями гидросмеси на твердые границы потока.

Важное значение имеет определение: 1) гидравлических характеристик потока гидросмеси в виде зависимости критической скорости, удельного потребного перепада давления (напора) от расхода (скорости движения) при заданном насыщении (концентрации) потока горной массой; 2) истинных концентраций твердых частиц в гидросмеси; 3) реологических констант для смесей, обладающих реологическими свойствами; 4) состояния твердых границ потока при ударном износе пульпопроводов.

Отдельные виды гидросмесей, представленные зернистыми и кусковыми фракциями, могут существовать только при движении, в то время как измельченные фракции многих горных пород могут образовывать достаточно устойчивые гидросмеси без расслоения на твердую составляющую и несущую среду. Поэтому требуется знать гидравлические характеристики осаждения различных фракций горной массы, различия между действительной (истиной) и расходной концентрациями в горизонтальном и восходящем потоках гидросмеси.

Эффективность гидравлического транспорта напрямую зависит от концентрации гидросмеси. Насыщение потоков физически имеет пределы в зависимости от крупности фракций горной массы. В то же время тонкоизмельченные промпродукты и закладочные смеси могут транспортироваться при насыщениях до 70 и даже до 80% по массе, для чего требуются повышенные динамические напряжения сдвига, а следовательно, высокие перепады давления. Физическое объяснение этого факта, равно как использование специальных реагентов (разжижителей), в этих случаях является существенным элементом изучения.

Использование изложенных в пособии знаний позволяет выделить технологические назначения гидротранспорта как непрерывного вида транспорта сыпучих материалов в пределах геолого-разведочного или горного производства, промышленного транспорта на внешних коммуникациях предприятий и транспорта на большие расстояния; рассматривать гидравлическое транспортирование как технологию, в процессе которой происходит подготовка горной массы к дальнейшей переработке и которая оказывает значительное влияние на все процессы горно-обогажительного производства.

1.2. Область и перспективы применения

Гидравлическое транспортирование является неотъемлемым процессом в технологиях опробования и бурения разведочных и взрывных скважин (выбуривания залежей угля и руд малой мощности), проведения стволов шахт и рудников, обогащительного передела рудного, химического и строительного сырья; технологиях освоения месторождений полезных ископаемых, добываемых открытым, подземным, комбинированным способами в сложных горно-геологических условиях. В геолого-разведочных технологиях широко осваивается промывка скважин с гидротранспортом керна (шлама) при форсированных режимах бурения. Гидромеханизированные открытые и подземные разработки вскрышных пород, добычи угля, руд, песка и гравия выполняются с использованием различных систем напорного (напорно-гравитационного) гидротранспорта, на использовании гидротранспорта основаны различные схемы подземной рудоподготовки.

Современное развитие гидротранспорта определяется запросами новых технологических процессов геолого-разведочного и горного производства.

Отметим следующие эффективные технологии с использованием этого вида гидротранспорта, признанные как приоритетные:

- химическая рекультивация горной массы;
- извлечение руды способом бурения в сложных горно-геологических условиях;
- валовое опробование подземных рудных тел и техногенных образований буровыми скважинами;
- выдача керна на основе энергосберегающих гидравлических систем промывки скважин;
- освоение водных источников горных предприятий;
- перекачка гидросмесей минерального сырья по внутрирудничным и магистральным трубопроводам и др.

В этих технологиях процессы гидротранспортирования осуществляют с горной массой, имеющей различные физико-механические свойства (крупность, плотность, способность к диспергированию и выщелачиванию, коагуляции и деградации при движении). Поэтому гидротранспорт следует рассматривать, как поточную технологию с непрерывным перемещением грузопотока, при которой одновременно с процессом транспортирования горной массы возможно обеспечить попутный водоотлив, подготовку руды к обогащению и при этом значительно снизить затраты на основные производственные процессы горного производства, капитальные и подготовительные работы, рудничную вентиляцию и первичную переработку руды.

Для него характерны накопление горной массы, загрузка, транспортирование, разгрузка с регулированием эксплуатационных параметров. Последние обобщаются с использованием методов механики для установления оптимального грузопотока (производительности по твердому материалу и гидросмеси), коэффициентов сопротивления движению, удельных потерь напора при движении воды и гидросмеси, определения энергозатрат и др.

С целью выделения этого направления в области трубопроводного транспорта, актуальность которого особенно очевидна для экономически напряженных промышленных регионов страны, где развивается минерально-сырьевая база, рассмотрим некоторые особенности гидротранспортных систем.

Наибольший объем исследований в области гидромеханизации, включая гидротранспорт, в том числе и на подземных горных работах, выполнен в угледобывающей промышленности, где она рассматривается как альтернативная традиционной технологии добычи и перемещения полезных ископаемых.

При подземной добыче руд перспективны гидротранспорт и гидроподъем горной массы. Особенно эффективно их применение при разработке месторождений со значительными запасами, водообильных, представленных рудами малой крепости и абразивности. Эффективность рудничного гидротранспорта и гидроподъема значительно повышается, если они сочетаются с технологией добычи и переработки руды, закладкой очистного пространства. В отличие от добычи угля, измельчение и увлажнение руды не являются недостатками, так как это необходимо при последующей переработке. В определенных геологических и горнотехнических условиях гидротехнология может объединить процессы очистных работ, транспортирования и переработки руды в одну поточную линию.

Анализ опыта проектирования и внедрения гидротранспорта в горнорудной промышленности показывает, что его эффективность может быть значительно повышена за счет упрощения схем вскрытия месторождения, улучшения технологических свойств сырья в процессе его перемещения и подготовки к последующей переработке на обогатительной фабрике, совершенствования транспортного оборудования.

Для всех видов механического транспорта характерно то, что по отношению к транспортным сосудам перемещаемый материал находится в состоянии покоя и при их передвижении не подвергается воздействиям, которые могли бы изменить его относительное положение, объем, качество, физико-механические свойства. При гидравлическом транспортировании происходит активное перемещение в пространстве не транспортного сосуда, а гидросмеси (пульпы), в которой материал представляет собой составную часть движущегося потока, принимая в движении непосредственное участие.

Эффективность гидротранспорта в значительной степени зависит от параметров потока гидросмеси, в том числе от соотношения твердого компонента к жидкому, физико-механических свойств перемещаемой руды или породы, скорости и поперечного сечения потока. Поскольку почти все эти параметры можно изменять во время движения гидросмеси (здесь и далее имеется в виду напорный гидротранспорт), процесс гидравлического транспортирования поддается регулированию без его остановки. Из этого следует, что, **в отличие от механического, гидравлическим транспортом (ГТ) можно управлять путем изменения параметров потока.**

Важнейшая особенность ГТ состоит в том, что, помимо основных функций (подземный транспорт, подъем, транспорт на поверхности), он зачастую позволяет решать и другие задачи.

Попутная подготовка полезных ископаемых к последующей переработке. Гидравлическое транспортирование отдельных типов руд сопровождается их дезинтеграцией, что в ряде случаев обеспечивает значительное снижение затрат на последующую переработку руд.

Исследованиями по определению целесообразности применения в условиях высокогорного Гведского месторождения (Грузия) гидротранспорта кальцитовый руды крупностью до 60 мм доказана перспективность этой технологии для предварительной подготовки руды перед ее обогащением [1]. Анализ ситовых характеристик показал, что при гидротранспортировании руда подвергается существенному истиранию. Так, выход класса —5 мм после транспортирования руды на 9,8 км увеличился в 3 раза, составив 60% в сравнении с 20% в исходной руде. Таким образом, гидротранспорт кальцитовых руд позволяет уменьшить на 40% объем сырья (+5 мм), поступающего на стадию мелкого дробления на обогатительную фабрику. Более интенсивному истиранию подвержен класс 0,63—5 мм, частный выход которого уменьшается с 12,7 до 1,6 %. Выход класса —80 мкм, являющегося конечным продуктом переработки кальцитов, после гидротранспортирования составил около 30%, в отличие от 1% в исходном материале.

При транспортировании гидросмеси для определенных типов и сортов руд возможно повышение качества руды и его стабилизация в результате усреднения содержания полезных компонентов.

Возможность повышения качества обусловлена тем, что при гидротранспортировании происходят как дезинтеграция, так и попутная промывка сырья. Особенно это ощутимо при транспортировании шламосодержащих руд (в том числе глиносодержащих): за счет отмыва и удаления шламов имеется возможность не только повысить содержание полезных компонентов в перемешиваемой руде, но и улучшить качественные показатели последующего обогащения. Выполненные расчёты показали, что применение на Яковлевском руднике КМА гидротранспорта богатых железных руд, обеспечивающего их дезинтеграцию и попутную промывку (рис. 8.1), позволит повысить содержание железа в руде в среднем на 1,36%. Эти выводы подтверждены экспериментальными исследованиями на опытно-промышленном стенде кафедры гидравлики и гидrofизических процессов МГРИ в г. Губкине (рис. 4.2). Установлено, что за счет дезинтеграции и отмыва тонких глинистых фракций, удаляемых в объеме 3% в слив на стадии обезвоживания, содержание железа в отмытой руде по сравнению с проектной технологией повышается на 1÷1,5% [2].

Повышение извлечения полезных компонентов при обогащении руды после ее гидротранспортирования установлено также исследованиями при повторной разработке на Салаирском руднике. Свинцово-цинковые руды повторной добычи Салаирского месторождения подвержены шламованию. Если в дробленной руде других полиметаллических месторождений содержится 4—8% класса —0,074 мм (при крупности руды 20—25 мм), то в салаирских рудах — до 17%. Содержание полезных компонентов в шламовой фракции: свинца 0,3—0,45%, цинка 1,4—1,8%, барита 13—15%. Повышение содержания класса —74 мкм с 8—9 до 14—18% в дробленной руде (после 2-й стадии дробления) приводит к снижению извлечения только барита на 3—4% за счет механических потерь его с тонкими нефлотируемыми классами. Ухудшение показателя обогащения с увеличением объёма шламовых фракций характерно для большинства полиметаллических руд. Для салаирских сильно ошламованных руд отмывку в процессе дробления рекомендуют как обязательный процесс. Сброс шламов до 3% улучшает селективное разделение свинца и цинка, снижает на 6% потери цинка в свинцовый концентрат, улучшает извлечение металлов в грубые концентраты — цинка на 5%, свинца на 2%, барита на 3%. Сброс более 3% отмытых шламов нецелесообразен — снижается извлечение металлов [3].

Рекомендованная нами технологическая схема гидроподъема (рис. 8.2), предусматривающая на заключительной стадии частичное (до 3%) отделение шламов из пульпы и совместную флотацию оставшейся части с тщательно измельченной отмытой рудой, позволяет получить дополнительный экономический эффект, в том числе за счет попутной промывки [3, 28].

Если изменение качества происходит только у определенных типов руд, то его стабилизация за счет усреднения содержания полезного компонента имеет место при гидравлическом транспортировании любой руды. Поскольку перемешиваемые куски руды отличаются между собой весом, формой, размерами, скорость их движения в потоке жидкости неодинакова. В большинстве случаев неодинаково и содержание полезного компонента в различных партиях руды, направляемых для транспортирования, различных выемочных блоков. В результате происходят усреднение содержания и обусловленная этим стабилизация качества руды. Улучшение результатов первичной переработки за счет предварительного частичного обогащения руды и усреднения содержания полезного компонента практикуется и при использовании механических видов рудничного транспорта, но для этого необходимы дополнительные затраты. При гидротранс-

портировании такое улучшение происходит попутно с перемещением руды, без увеличения трудоемкости и себестоимости транспортирования. Вместе с тем наряду с возможностью улучшения показателей обогащения гидравлическое транспортирование связано с неизбежными потерями руды в сливах, если перед обогащением требуется частичное или глубокое обезвоживание.

Снижение объемов ГКР. Увеличение производственной мощности рудника. Рудничный гидротранспорт в некоторых случаях обуславливает необходимость изменения схем вскрытия и способов подготовки. Предназначенные для механического транспорта и объема выработки включают излишние при гидротранспортировании горноподготовительные выработки. Гидравлический транспорт за счёт высокой производительности, компактности размещения трубопроводов, способности перемещать сырьё при любых углах наклона коммуникаций дает возможность исключить ряд выработок, уменьшить их сечение, сократить протяженность. К примеру, на рудниках с большой производительностью и глубиной разработок отпадает необходимость в проведении нескольких подъемных стволов. За счёт упрощения схемы вскрытия и способа подготовки сокращаются единовременные и текущие затраты.

Так, проектные проработки, выполненные институтом «Центрогидроруда» по результатам наших исследований для Яковлевского рудника (рис. 8.1), показали, что объем ГКР при варианте с гидротранспортом и гидроподъемом руды по сравнению с железнодорожным транспортом и скиповым подъемом при годовой производительности 4,5 млн т руды сокращается на 63 144 м³, необходимое количество стволов уменьшается с четырех до трех [2].

Вовлечение в отработку Сretenской залежи с увеличением производственной мощности шахты им. Губкина почти в два раза (до 7 млн т) с использованием схемы гидроподъёма позволит отказаться от проходки дополнительного рудовыдачного ствола за счёт размещения става пульпопроводов в существующих выработках.

Капитальные затраты по рекомендуемому варианту гидроподъёма составят менее 20% от проектного варианта скипового подъёма [6].

Технологическая схема гидроподъёма при комбинированной разработке Лебединского и Южно-Лебединского месторождений ниже отметки –250 м (рис. 8.3), предусматривающая годовую выдачу 20 млн т дробленых под землей железистых кварцитов (рис. 8.3), обеспечивает снижение удельных капитальных затрат на 0,3 руб./т добытой руды; примерно 70% приходится на ГКР [7].

Попутный водоотлив. Одним из преимуществ ГТ является возможность осуществления попутного водоотлива. Так, по проектной схеме гидротранспорта руды на Яковлевском руднике одновременно с гидроподъёмом руды может осуществляться попутная выдача шахтных вод в объёме 2960 м³/ч. Таким образом, значительно сокращаются эксплуатационные затраты на водоотлив по сравнению с базовым вариантом [2].

Другие задачи, решаемые за счет использования ГТ. Возможности ГТ позволяют решать и другие задачи: доставку обводненных руд и пород; борьбу со слеживаемостью и налипанием руд; обеспечение высокой степени механизации и автоматизации транспортирования; улучшение санитарно-гигиенических условий труда; доставку закладочной смеси или ее компонентов. Эффективность ГТ как средства борьбы с налипаемостью, слеживаемостью руд подтверждается исследованиями в условиях разработки обводненных и склонных к налипанию богатых железных руд Яковлевского месторождения.

Так как гидравлический транспорт обеспечивает непрерывность перемещения гидросмеси без промежуточных пунктов перегрузки, он позволяет в определенных условиях осуществлять сквозное транспортирование от места приготовления гидросмеси до конечного пункта назначения, образуя непрерывную транспортную линию. Гидротранспорт, характеризующийся высоким уровнем

механизации и соответственно малой трудоемкостью, может быть полностью автоматизирован. В сочетании с неразрывностью транспортирования это позволяет создать на базе ГТ высокоэффективную поточную технологию перемещения горной массы.

Одно из предназначений рудничного гидротранспорта — доставка закладочной смеси или ее компонентов. Выполненный анализ опыта работы закладочных комплексов в России и за рубежом, а также применения твердеющей закладки на СУБРе позволил наметить основные пути снижения себестоимости приготовления и доставки твердеющей смеси в условиях шахты № 15-15 бис СУБРа: использование более дешевых вяжущих компонентов; полная или частичная замена привозного известняка породой из проходческих забоев, переход от пневматического транспорта закладочной смеси к гидравлическому. Нами разработаны технологические смеси и конструкция транспортно-закладочного комплекса для изготовления твердеющей смеси с раздельной гидродоставкой компонентов (раствора вяжущего и инертного заполнителя) к закладываемым камерам и смешиванием их в передвижной закладочной установке (ПЗУ), обеспечивающей доставку готовой смеси в выработанное пространство (рис. 8.4) [8, 9]. Особенностью схемы является возможность использования в качестве компонента твердеющей закладочной смеси пород, получаемых при проходке горных выработок. Предложенная технология, включающая узел приготовления раствора вяжущих компонентов на поверхности, стационарный узел подготовки и транспортирования породы под землей, ПЗУ, насосную станцию, в значительной мере решает проблемы закладочных работ в СУБРе при ощутимой экономии.

При гидравлическом транспорте необходимы относительно малые размеры кусков руды. Для получения заданной кусковатости возможны два способа: улучшение качества дробления руды при отбойке соответствующим подбором параметров буровзрывных работ (БВР) или оснащение узла подготовки гидро-смеси оборудованием для грохочения, дробления, а иногда и измельчения отбитой руды (породы). Поскольку оба способа связаны с дополнительными затратами, оптимальное решение для конкретных условий находят путем их технико-экономического сравнения.

Практика применения и проектирования ГТ, а также результаты исследований показывают, что необходимая эффективность гидротранспорта достигается при: транспортировании обводненных руд или руд с высокой налипаемостью; завершении процесса гидротранспортирования мокрым обогащением; совмещении гидроподъема и гидротранспорта с попутным водоотливом; низкой себестоимости подготовки и обезвоживания сыпучего материала по сравнению с себестоимостью самого транспортирования; годовой производительности более 1 млн т; комплексной механизации и автоматизации процесса; рельефе трассы, не благоприятной для других видов транспорта (например, в горной местности).

Потенциальные возможности ГТ как основы гидротранспортной технологии обуславливают перспективность его применения в специфических условиях повторной добычи и открыто-подземной разработки месторождений.

О приоритетности гидротранспорта в условиях повторной добычи свидетельствуют следующие особенности: необходимость во многих случаях небольшого сечения транспортных выработок; отсутствие жестких требований к выдерживанию их параметров; наличие труднодоступных мест извлечения потерянной руды и др. Особое значение имеет возможность при гидротранспорте улучшения качественных и стоимостных показателей обогащения, что объясняется следующим. По качеству руды, поступающей на обогащение, первичная разработка месторождений, как правило, превосходит повторную; руда обычно переизмельчена и покрыта пленкой окислов. Это приводит к измене-

нию показателей обогащения. Анализ опыта обогащения руд повторной добычи в России и за рубежом показал, что в условиях совместной первичной и повторной разработки соответствие технологических свойств руд имеет важное значение. Если руды повторной разработки обладают худшей обогатимостью, чем при первичной, технологические показатели при их совместной переработке снижаются. Наиболее рациональны в таком случае селективная добыча, транспорт и переработка. Однако при традиционных видах транспорта селективная подача руды на обогатительную фабрику не всегда осуществима. Гидравлическое транспортирование решает указанную проблему. Исследования, проведенные нами при повторной разработке свинцово-цинковых руд месторождения «Спорное» Салаирского рудоуправления, подтверждают это. Добавление руды «Спорного» в объеме 5—10% текущей добычи повысило содержание цинка в одноименном концентрате на 1—2% при стабильном содержании его в хвостах и свинцовом концентрате. Дальнейшее увеличение доли руды «Спорного» (от 10 до 25%) ухудшило показатели обогащения. Это вызвано тем, что свинцово-цинковые руды повторной добычи за прошедшее время (1968—1979) окислились, причем окисление носило поверхностный характер, так как с ростом общего содержания свинца в руде содержание окисленных форм не увеличивается. Окисленная пленка может легко отделяться с поверхности кусков руды, что подтверждается работами В. И. Классена, проведенными для галенита. При длительном окислении пленка отслаивается, а затем процесс повторяется, при этом повышается содержание класса $-0,044$ мм в пробах руды, взятых в различное время после прекращения первичной разработки. Наличие окисленных форм свинца и цинка в шламовых фракциях является причиной ухудшения показателей обогащения. Отмывка и выделение шламов позволят улучшить эти показатели. *Изучение природы переошламованности руд повторной добычи позволяет рекомендовать напорный гидротранспорт как средство повышения качества труднообогатимых руд за счет попутной промывки.* Выделенную шламовую фракцию можно обогащать в отдельном цикле. При гидротранспорте появляется возможность совместной переработки руд первичной и повторной добычи после промывки руды в процессе ее гидравлического транспортирования и отделения шламов по существующей для руд первичной добычи технологии. Это позволяет дополнительно вовлечь в разработку, например, на месторождении «Спорное» около 800 тыс. т руды с содержанием не ниже кондиционного, что может существенно расширить сырьевую базу Салаирского рудоуправления и позволит получить дополнительное количество металла с издержками, не выше существующих.

При открыто-подземной разработке применение гидротранспорта сокращает затраты на проведение выработок при вскрытии и подготовке залежей под дном карьера, повышает комфортность работ в подземных условиях и в зоне карьера, позволяет уменьшить площадь изымаемых из оборота земель.

Результаты наших исследований по обоснованию перспективности открыто-подземной разработки мощных рудных месторождений с использованием гидравлического транспорта руд, пород и концентрата согласовываются с основными выводами работ по обоснованию комбинированной разработки месторождений КМА, выполненных институтами НИИКМА им. Л. Д. Шевякова и ВЗПИ [2, 6, 10].

Гидравлический транспорт органически вписывается в существующую технологию добычи и обогащения. При этом обеспечивается интенсификация открытых горных работ с понижением глубины за счёт максимального увеличения угла наклона рабочего борта и сокращения в плане рабочей зоны карьера. Перемещение горной массы потоком воды решает проблемы одновременной выдачи руды и складирования пустых пород, размещения отходов обогащения в выработанном пространстве; проведения в зоне очистной выемки

закладочных работ; предварительного и попутного обогащения; снижения запыленности атмосферы и др.

Для открыто-подземной разработки месторождений КМА правомерна постановка задачи о целесообразности переноса всего или части цикла обогащения руды в подземные условия. Техническая возможность решения указанной задачи подтверждается опытом эксплуатации подземных комплексов обогащения на ряде зарубежных рудников. Размещение обогатительного оборудования под землей создает условия для гидроподъема и гидротранспорта готового концентрата непосредственно к потребителю, а хвостов обогащения — в выработанное пространство карьера и в подземные камеры.

Проработка технологических схем гидроподъема и гидротранспорта железорудного сырья в условиях перспективной в будущем открыто-подземной разработки Лебединского месторождения КМА показала эффективность этой технологии даже для гидротранспорта и гидроподъема железистых кварцитов. Рекомендуемая схема рудоподготовки под землей предусматривает возможность предварительного обогащения дробленых железистых кварцитов методом «сухой» магнитной сепарации, что позволяет, по данным исследований комбината «КМАруда», вывести из дальнейшей переработки около 13% некондиционных руд. Это повышает производительность измельчительного отделения ОФ и снижает эксплуатационные расходы на обогащение, так как содержание $Fe_{\text{магн}}$ в руде увеличивается после «сухой» магнитной сепарации с 26,8 до 30,53%. Расчёты показывают, что с учётом снижения себестоимости концентрата, даже с учётом убытков из-за потерь металла в хвостах «сухой» магнитной сепарации, общегодовой экономический эффект от применения гидроподъема и гидротранспорта дробленых железистых кварцитов из подземных горных выработок до ОФ при комбинированной разработке Лебединского месторождения увеличивается на 15% [7, 10].

Оценка возможности применения гидротранспортной технологии при комбинированной разработке Приоскольского месторождения КМА для вариантов гидроподъема дробленых (–30 мм) и измельченных под землей в мельницах МПР 45/60 (50% класса –0,074 мм) железистых кварцитов (с предварительным обогащением методом «сухой» магнитной сепарации) также показала эффективность этой технологии по сравнению с традиционной (скиповой подъём и ж/д транспорт до ОФ). Проектные проработки гидротранспортной технологии при открыто-подземной разработке Приоскольского месторождения КМА, проведенные Институтом «Центрогидроруда», подтверждают это (рис. 8.5) [7].

Таким образом, специфические особенности и обусловленные ими возможности ГТ дают основание рассматривать его не как обособленный производственный процесс, а в качественно ином виде: как **основу гидротранспортной технологии**, включающей горизонтальное перемещение горной массы под землей и на поверхности, подъем, водоотлив, подготовку сырья к последующей переработке и воздействующей на технико-экономические показатели основных стадий горно-обогатительного производства.

1.3. Краткий очерк развития

Первые установки гидравлического транспорта появились на приисках в виде желобов и вашгердов для отмыва золота и алмазов в глубокой древности. На фабриках и заводах различных производств этот вид транспорта осваивается примерно с середины XIX в. Широкое распространение в нашей стране гидравлический транспорт получил с развитием горнодобывающей промышленности, дноуглубительных и мелиоративных работ в конце 1920—1930-х гг.

(добыча торфа, драгоценных металлов и строительных материалов, гидростроительство и др.).

В эти годы системы гидравлического транспорта, оборудованные струйными и центробежными насосами, соответствовали требованиям производства на гидромеханизированных добычных и обогащательных комплексах. Параметры систем гидротранспортирования зависели от технологии гидравлического способа разрушения горной массы в целике и характеризовались небольшими расстояниями перемещения гидросмесей с концентрациями до 10—15% содержания твердой массы по объёму.

Индустриализация страны в последующие годы способствовала резкому повышению спроса на различное минеральное сырьё, росту масштаба производства, увеличению производительности и мощности гидротранспортных систем, повышению сортаментов труб по диаметру, их износоустойчивости, росту дальности подачи горной массы. В эти предвоенные, а также послевоенные годы были поставлены исследования по гидротранспорту торфа во ВНИИТорф и песков в ВНИИГим.

В 1960—1980-х гг. осуществлялось крупное гидротехническое строительство, в значительных масштабах происходил рост сырьевой базы промышленности. Гидротранспортные системы с диаметрами труб до 600—800 мм были освоены на железорудных ГОКах и предприятиях цветной металлургии. Успешно внедрялись крупные земснаряды для гидротехнических работ и добычи нерудного сырья. Расширялось производство вскрышных работ на угольных шахтах.

Развитие промышленности стимулировало постановку научно-исследовательских работ по гидротранспорту в связи с ростом грузопотоков, разнообразием сырья, повышением энергозатрат и мощности транспортных систем. Способствовало развитию исследований в данной области строительство гидрошахт для добычи угля гидравлическим способом. Хотя это направление не дало ожидаемых результатов, но оно способствовало совершенствованию силового оборудования при механизации тяжелых и трудоемких работ в горном деле.

Последние десятилетия прошедшего века выявили два направления в изучении гидротранспорта: относящиеся к определению собственно транспортных характеристик доставки горной массы по трубам и относящиеся к разделу трубной гидравлики гидросмесей — особого рода неоднородных потоков жидкости. Первое направление определяется технологией основного производства и включает вопросы оптимизации грузопотоков: достижение минимальных затрат энергии и трудоёмкости, максимального ресурса использования оборудования, установление рациональной области применения трубопроводного транспорта для различных видов гидросмесей горной массы.

Второе направление в изучении гидротранспорта касается различных форм течения гидросмесей в трубопроводах различной направленности, разработки математических зависимостей для определения величины сопротивления при движении потоков различных видов гидросмесей на основе физического и натурного эксперимента, обоснования гидравлических параметров технически и экономически целесообразного транспорта горной массы или промпродукта, а также установления гидравлических характеристик трубопроводов и транспортных систем применительно к потребностям определенного вида производства.

Поскольку гидротранспорт, как и большинство технических приложений гидравлики, развивается в основном на результатах экспериментальных и опытно-промышленных работ, в Советском Союзе в последние десятилетия прошлого века такие исследования выполнялись отраслевыми научными организациями. В МИСИ им. В. М. Куйбышева и ВНИИЖелезобетон — для условий добычи земснарядами песков; в Институте гидродинамики АН УССР — для потребностей железорудных предприятий; в Институте гидротехники

(ВНИИГ) — для гидротехнического строительства; в ИГД АН СССР им. А. А. Скочинского — для условий подземной разработки угля и руд цветных металлов; в МГРИ им. С. Орджоникидзе — для условий рудников КМА, урановых рудников Средней Азии, ряда горнодобывающих предприятий цветной металлургии.

Экспериментальные исследования, аналитические обобщения их результатов, методические, расчетные разработки и инженерные рекомендации по проектированию гидротранспортных трубопроводов, разработки новых технологий и оборудования гидротранспорта в указанных институтах выполнялись соответственно под руководством профессоров А. П. Юфина, А. Н. Силина, М. А. Дементьева, В. В. Трайниса, А. Е. Смолдырева, О. С. Брюховецкого и ряда других ученых.

Наиболее полное и системное изучение особенностей напорного гидротранспортирования твердых материалов различного дисперсного состава принадлежит профессору А. Е. Смолдыреву и его ученикам.

В течение последних 25 лет в промышленных странах мира также получили интенсивное развитие НИОКР и проектные работы по гидравлическому и пневматическому транспорту угля, концентратов руд, глин, бентонитов, мела, дисперсных бытовых и промышленных отходов. Проведены мировые конгрессы «Гидротранспорт 1-11» и 4 конгресса «Пневмотранспорт 1-4», 7 локальных конференций в Польше, ГДР, Венгрии и других странах. Появился международный «Трубопроводный журнал». Были созданы крупные специализированные лаборатории и КБ в разных странах, включая Советский Союз.

Итогом проведенных НИОКР и проектных работ стало строительство уникальных магистральных и гидротранспортных трубопроводов в США, Канаде, странах Южной Америки, Австралии протяженностью до 500 км (а в проектах до 2 тыс. км). Разработаны и серийно выпускаются специализированные диафрагменные и поршневые насосы высокого давления и на повышенные расходы. Мировая практика располагает более чем 100 тыс. км продуктопроводов. Более 200 горнодобывающих предприятий с открытым и подземным способами используют элементы гидромеханизации.

В нашей стране заметным результатом развития данного направления стало строительство углепровода «Белово — Новосибирск» проектной производительностью 3 млн т/год и протяженностью 262 км для угольной суспензии, подлежащей сжиганию в котлах. Проведена опытная его эксплуатация. Созданы несколько опытно-промышленных пневмоконтейнерных установок. Разработаны опытные образцы оригинальной конструкции насосов на повышенные давления и расходы. В значительных объемах транспортировались закладочные и заливочные гидросмеси.

В мировой практике на основе трубопроводного транспорта отрабатываются передовые технологии — гидрогенизации угля (японская, немецкая, американская), транспорт твердого топлива в метаноле, сжиженном CO_2 , технологии утилизации дисперсных техногенных и бытовых отходов, взаимодействия трубопроводного и морского транспорта минерального сырья и др.

1.4. Некоторые сведения из гидравлики

Определение гидравлических сопротивлений трения при движении воды или другой однородной жидкости в твердых границах составляет основную задачу гидравлики как раздела механики жидкости. Её решение не поддается точной теоретической схематизации и требует экспериментальных исследований с последующим аналитическим обобщением результатов. Для преодоления гидравлических сопротивлений требуется создать перепад давления, который

при работе гидротранспортной системы по воде может составлять до 70—80% потребного перепада давления при движении гидросмесей, особенно в производственных процессах с небольшими концентрациями твердой фазы.

В гидравлике силы сопротивления представляются в виде непрерывно распределенных нагрузок. Поэтому пользуются понятием *напряжения силы*. Если выделить в потоке жидкости определенный объем, то действующие силы можно разделить на объёмные (силы тяжести и инерции) и поверхностные (обусловленные давлением, вязкостью) силы, нормально действующие и касательные силы. Известные ламинарные и турбулентные режимы движения характеризуются напряжением нормальных поверхностных сил — давлением и касательным напряжением трения.

Исследования показали, что потери энергии при движении жидкости существенно зависят от характера движения частиц жидкости в потоке и режима движения жидкости.

В 1883 г. английский физик О. Рейнольдс экспериментально доказал наличие различных видов движения жидкости. Оказалось, что если скорость потока жидкости (воды) ϑ меньше некоторого ее критического значения $\vartheta_{кр}$, то жидкость движется отдельным не перемещающимися между собой слоями. Линии тока при таком течении прямолинейны и устойчивы. При достижении потоком критического значения скорости движение отдельных струек становится волнообразным в результате изменений во времени (пульсации) векторов местных скоростей. При дальнейшем увеличении скорости жидкости $\vartheta > \vartheta_{кр}$ в потоке образуются вихри, за счёт которых происходит перемешивание жидкости.

Движение жидкости, при котором отсутствуют изменения (пульсации) местных скоростей, приводящие к перемешиванию жидкости, называют **ламинарным**.

Движение жидкости, при котором происходят пульсации местных скоростей, приводящие к перемешиванию жидкости, называют **турбулентным**.

Из четырех определяющих параметров течения жидкости: динамического коэффициента вязкости μ , плотности жидкости ρ , диаметра трубопровода D и средней скорости потока ϑ , можно образовать безразмерный критерий. В честь О. Рейнольдса этот критерий был назван числом Рейнольдса и обозначен Re :

$$Re = \frac{\vartheta D \rho}{\mu} = \frac{\vartheta D}{\nu}, \quad (1.1)$$

где μ — коэффициент динамической вязкости; $\mu = \nu \rho$; ν — коэффициент кинематической вязкости, m^2/s ; ρ — плотность жидкости, kg/m^3 .

Критерий позволяет судить о режиме движения жидкости в трубе. При значениях $Re < Re_{кр}$ — ламинарное течение жидкости, где $Re_{кр}$ — значение числа Re при $\vartheta = \vartheta_{кр}$.

Опыты показывают, что в трубах переход ламинарного течения в турбулентное происходит при вполне определенных значениях безразмерного параметра — числа Рейнольдса (критического), $Re_{кр} \approx 1160$ (ниже только ламинарный режим), $Re_{кр} \approx 6410$ (выше только турбулентный). Эти режимы характеризуются различными касательными напряжениями трения, поэтому перепад давления или потери напора на трение оказываются весьма различными в зависимости от скорости движения потока.

Твёрдые поверхности, с которыми соприкасается поток жидкости, оказывают на него тормозящее влияние. Касательные напряжения, возникающие на границе потока с твердой стенкой, а также внутри жидкости за счет вязкости, создают сопротивление движению потока, называемое сопротивлением трения или **потерей энергии на трение по длине, или просто потерей по длине**.

Определение потерь на трение является одной из важнейших задач технической гидромеханики.

В настоящем учебном пособии рассматриваются потери энергии на трение для равномерного движения жидкости (площадь сечения потока не меняется по длине).

Потери энергии, как правило, не могут быть найдены из уравнения Бернулли, так как обычно в левой части уравнения неизвестен один из членов, чаще всего давление в начале исследуемого участка трубопровода.

При течении жидкости по трубопроводам часть энергии тратится на преодоление сил трения внутри жидкости между ее слоями и о стенки, и эти потери обозначают h_τ или h_l .

Различают еще местные потери энергии, которые возникают в результате изменения структуры потока по пути движения (в кранах, задвижках, муфтах и т. п.). Такие потери обозначают h_m .

Таким образом, общие потери на участке трубопровода 1—2 являются суммой потерь напора по длине и в местных сопротивлениях, т. е.

$$h_{1-2} = h_l + h_m. \quad (1.2)$$

Потери напора по длине трубопровода определяются по формуле Дарси — Вейсбаха [8]:

$$h_l = \lambda \frac{l}{D} \frac{\vartheta^2}{2g}, \quad (1.3)$$

где l — длина участка трубопровода; D — его диаметр; λ — безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления; ϑ — средняя скорость движения жидкости.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ является функцией числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости Δ/D стенок трубопровода (Δ — абсолютная шероховатость), т. е.

$$\lambda = \lambda \left(Re, \frac{\Delta}{D} \right). \quad (1.4)$$

Для ламинарного режима движения формула для λ может быть получена теоретически (формула Пуазейля):

$$\lambda = 64 / Re. \quad (1.5)$$

Если подставим значение λ по Пуазейлю в формулу Дарси — Вейсбаха, то получим

$$h_l = \frac{32\eta l}{gD^2} v. \quad (1.6)$$

Таким образом, потери напора на трение при ламинарном режиме пропорциональны средней скорости жидкости и длине трубы.

Для турбулентного движения жидкости ввиду сложности его структуры расчетные формулы для λ могут быть получены лишь полуэмпирическим путем, при этом основную роль играют опытные данные. Из многочисленных опытов было установлено, что свойства турбулентного потока (распределение скоростей по сечению, коэффициент гидравлического сопротивления и др.) зависят от числа Re и относительной шероховатости.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru