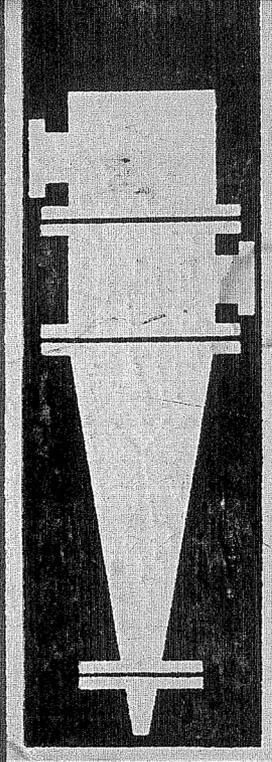


622.755
А40



М.Г.АКОПОВ

**ОСНОВЫ
ОБОГАЩЕНИЯ
УГЛЕЙ
В ГИДРО-
ЦИКЛОНАХ**

М. Г. АКОПОВ

ОСНОВЫ
ОБОГАЩЕНИЯ
УГЛЕЙ
В ГИДРОЦИКЛОНАХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва 1967

АННОТАЦИЯ

В книге изложены основные положения теории и технологии обогащения углей в гидроциклонах. Обобщены и систематизированы закономерности движения и разделения минеральных зерен при процессах обогащения углей в тяжелой суспензии и в водной среде. Дана методика расчета гидроциклонов.

Книга предназначена для научных работников, инженеров-производственников, а также для студентов горных вузов.

ВВЕДЕНИЕ

Директивы XXIII съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1966—1970 гг. предусматривают дальнейшее значительное развитие углеобогащения.

Гравитационное обогащение полезных ископаемых, имеющее наряду с флотационным наиболее важное промышленное значение, вступает в новую фазу своего развития.

Обогащение углей крупных классов в настоящее время проходит довольно успешно благодаря применению тяжелых суспензий и усовершенствованию отсадки. Обогащение мелких классов углей и повышение эффективности вспомогательных операций при обработке тонкоизмельченных продуктов (сгущение, классификация, обесшламливание и т. п.) связаны с большими трудностями.

Главной причиной, ограничивающей дальнейшее развитие гравитационных методов обогащения и обработки мелких и тонких зерен, является невысокая скорость падения этих зерен в воде. Небольшая масса мелких частиц приводит к тому, что их сила тяжести приближается к сопротивлению среды движению данных частиц. Наиболее резко этот фактор сказывается при очень небольших размерах частиц (порядка нескольких десятков микрон) и при искусственном повышении вязкости среды (в случае обогащения в тяжелых суспензиях).

Следовательно, все попытки улучшить существующие способы гравитационного обогащения мелких классов, основанные на использовании силы тяжести, могут иметь лишь частный успех.

Поэтому требуется изыскание принципиально новых способов повышения эффективности разделения мелких зерен, имеющих различную массу.

Одним из таких направлений исследований является применение центробежной силы, действующей на минеральные зерна совместно с силой тяжести или даже независимо от нее.

Изучение разделения мелких зерен различной массы в поле центробежной силы весьма характерно для исследований последних

лет, и результаты некоторых из них уже нашли промышленное применение.

К работам этого направления относятся исследования обогащения угля в центрифугах, конструирование и испытание различных центробежных аппаратов, применение гидроциклонов для классификации, обогащения руд и углей.

Начиная с 1954 г. концентрируется внимание на обогащении полезных ископаемых в гидроциклонах, которые находят все большее применение в различных отраслях техники. С помощью гидроциклонов осуществляются самые различные операции, основными из которых являются обогащение руд и угля, обезвоживание мелкого материала, обесшламивание, классификация. В горнорудной промышленности гидроциклоны применяются для обогащения руд, в особенности редких металлов, для классификации вместо механических классификаторов. Применение гидроциклонов в качестве аппаратов для классификации способствует получению большей тонкости измельчения отдельных продуктов, повышению точности классификации и достижению более высокого извлечения полезного минерала в концентрат.

Тонкая классификация шламовых продуктов при помощи гидроциклонов позволяет значительно изменить гранулометрический состав исходного материала перед концентрацией на шламовых столах или флотацией и тем самым повысить извлечение полезного минерала.

Однако, несмотря на целесообразность применения гидроциклонов для осуществления целого ряда производственных операций, широкое промышленное внедрение их требует разработки теоретических основ разделения материала в поле центробежной силы. Для этой цели необходимы проведение тщательного экспериментального исследования гидродинамических процессов в циклоне, исследование закономерностей разделения минеральных зерен по крупности или плотности, а также выявление влияния основных факторов на эффективность процесса разделения.

Соответствующее экспериментальное исследование, безусловно, представит научную и практическую ценность для разработки теории процессов разделения в гидроциклоне, позволит улучшить конструкцию этого аппарата и быстрее освоить его для широкого внедрения в технику обогащения полезных ископаемых.

Теоретический анализ гидродинамических условий в циклоне, сделанный Дриссеном, Крайнером, Тарьяном, Деметером и другими, дает представление лишь о принципиальной сущности кинематики жидкости, общих характеристиках изменения скоростей в поле центробежной силы в гидроциклоне. Несмотря на важность и ценность этих теоретических исследований, основные вопросы теории гидроциклонов оставались нерешенными, тем более, что предложенные математические зависимости между основными параметрами во многих случаях не подтверждались экспериментальными данными.

Зависимость между тангенциальной скоростью и радиусом вращения жидкости в гидроциклоне, полученная Дриссеном и дру-

гими исследователями, оказывается справедливой лишь для частного случая и, как это показывают данные экспериментального исследования, не справедлива даже для одного и того же типа гидроциклонов при различных размерах отверстия питания, сливной трубки и насадки.

Недостаточно было изучено движение минеральных зерен в гидроциклоне. Единственно ценной работой в этой области является экспериментальное исследование Келсалла. Однако основная цель этой работы состояла не в исследовании движения твердых частиц, а в измерении скоростей движения жидкости при помощи тонких алюминиевых пластинок, вводимых вместе с жидкостью в гидроциклон.

За последние годы измерением скоростей движения твердых частиц в гидроциклоне занимались в ряде научно-исследовательских институтов (ГИГХС, ИГД им. А. А. Скочинского, ИГИ).

В ИГД им. А. А. Скочинского были исследованы также выделение растворенных газов из воды в гидроциклоне, что имеет важное значение в процессах обогащения угля с применением реагента, и влияние основных параметров гидроциклона на результаты обогащения. Известно, что гидроциклоны применяются для обогащения угля, главным образом в тяжелых суспензиях. Исследованы закономерности разделения зерен угля и породы, в частности характер распределения их при различных условиях.

Изучено также влияние крупности суспензоида на эффективность обогащения угля в гидроциклоне.

В настоящей монографии обобщены результаты исследований, проведенных в различных институтах СССР и некоторых зарубежных странах, а также изложены основные положения теории и технологии обогащения углей в гидроциклонах.

Автор выражает благодарность чл. корр. АН СССР И. Н. Плакшину, докт. техн. наук, проф. В. И. Классену, канд. техн. наук Гольдину Е. М. и научным сотрудникам Института горного дела им. А. А. Скочинского и Института горючих ископаемых за ценные советы и участие в проведенных исследованиях гидроциклонов.

ГИДРОЦИКЛОНЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В УГЛЕОБОГАЩЕНИИ

1. ГИДРОЦИКЛОН И ПРИНЦИП ЕГО ДЕЙСТВИЯ

Внедрение гидроциклонов во многих отраслях промышленности происходит исключительно быстро. Это объясняется удачным сочетанием простоты конструкции аппарата с возможностью использования более прогрессивных способов воздействия на обрабатываемый материал.

Гидроциклоны применяются для гравитационных процессов обогащения, основанных на различии в движении зерен. Использование этого различия при обработке относительно мелких зерен крайне затруднено вследствие небольшой скорости перемещения их в воде под действием силы тяжести.

Поскольку с уменьшением размеров зерен их масса снижается пропорционально кубу диаметров, а силы сопротивления — пропорционально квадрату диаметров (или даже в меньшей степени), абсолютная скорость перемещения мелких зерен в воде под действием силы тяжести очень невелика. Именно этим объясняется невысокая производительность аппаратов для сгущения, классификации и обогащения мелкого и тонкозернистого материалов. Повышение эффективности этих процессов может быть достигнуто путем замены силы тяжести центробежной силой. Как показано ниже, таким путем можно в сотни раз увеличить активную силу, благодаря чему скорости перемещения зерен в среде резко возрастают. Полное использование этого обстоятельства в гидроциклонах при почти предельной простоте их конструкции и явилось главной причиной столь быстрого и широкого их внедрения в промышленность.

Главными преимуществами гидроциклонов перед другими аппаратами являются:

- 1) высокая производительность (как абсолютная, так и отнесенная к занимаемой площади);
- 2) более четкое выделение тонких фракций;
- 3) возможность работы на более плотных суспензиях;
- 4) невысокая стоимость и простота конструкции.

Гидроциклон (рис. 1) состоит из двух основных частей — цилиндрической 1 и конической 3. В цилиндрической части имеется отверстие, по которому через патрубок 2 исходная пульпа подается в гидроциклон тангенциально. Для удаления зерен меньшей плотности (при обогащении) или мелкого класса (при классификации) имеется патрубок 6.

К вершине конуса гидроциклона прикрепляется насадка 4, через отверстие которой происходит разгрузка зерен большей плотности (или крупного класса при классификации). Пульпа подается в гидроциклон под давлением от 0,5 до 5 атм. Это давление создается насосом или за счет напора столба пульпы.

Обычно гидроциклон устанавливается вертикально (вершиной конуса вниз), но он может быть установлен также в горизонтальном или наклонном положениях. При любой ориентации гидроциклона в пространстве более тяжелые зерна направляются к вершине конуса и разгружаются через насадку 4, а более легкие — перемещаются в противоположном направлении, проходя сливное отверстие 5, и удаляются через патрубок 6. Под действием значительной центробежной силы разделение зерен различной плотности или различной крупности происходит с относительно большой скоростью. Более тяжелые зерна отбрасываются к периферии и, спускаясь по стенке к вершине конуса, разгружаются через насадку. Вследствие уменьшения сечения гидроциклона по направлению к вершине конической части одновременно происходит и сгущение материала.

При работе в гидроциклоне образуется «естественный утяжеленный слой» из частиц промежуточной плотности и сростков, которые находятся во взвешенном состоянии. Скопление этих частиц, в особенности в нижней зоне конуса, повышает плотность среды, вследствие чего улучшается процесс разделения.

Частицы, не способные преодолеть сопротивление радиального потока жидкости, уносятся этим потоком в центральную часть гидроциклона и, попадая во внутренний восходящий поток, выносятся через сливное отверстие.

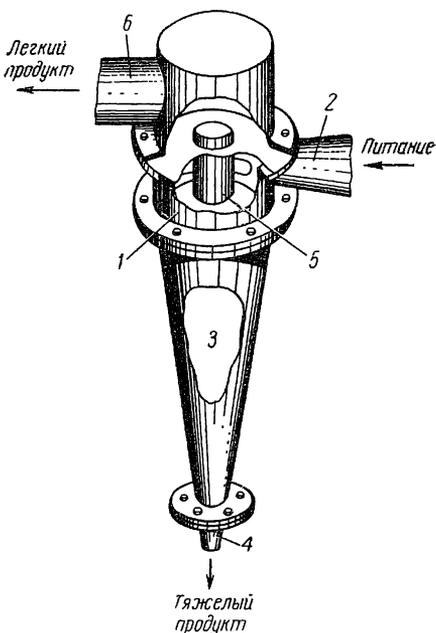


Рис. 1. Общий вид гидроциклона

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Конструкция гидроциклонов, применяемых в технике обогащения, еще не совсем стабилизировалась. В большинстве случаев гидроциклоны имеют короткую цилиндрическую часть с патрубком для тангенциального ввода обрабатываемого материала. К цилиндрической части при помощи фланцев присоединяется коническая часть, состоящая из деталей, которые легко заменяются по мере их износа. В зависимости от назначения гидроциклона коническая часть выполняется с углом конусности от 10 до 60° и более. Гидроциклон

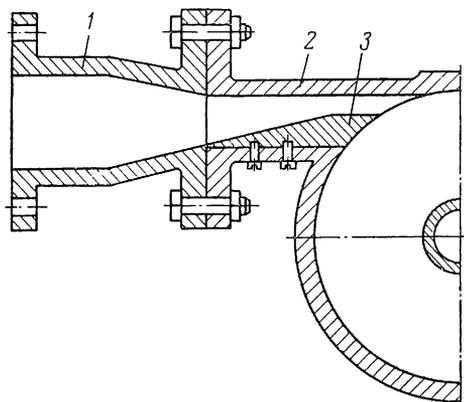


Рис. 2. Питающий патрубок гидроциклона со сменными насадками

для тонкой классификации или сгущения шламов имеет угол конусности от 10 до 20°, для обогащения угля в тяжелых суспензиях этот угол может увеличиваться до 30—45°, а в случае обогащения в водной среде — до 60—80°.

Корпус гидроциклона изготавливается из металла, реже из литого камня. Для уменьшения износа вследствие абразивного действия обрабатываемого материала, содержащего твердые минералы, внутренняя поверхность конической части гидроциклона футеруется литой резиной. У гидроциклонов большого диаметра внутренняя поверхность всех частей корпуса иногда гуммируется слоем синтетического износостойчивого каучука.

Иногда для удобства установки гидроциклона, в особенности малого диаметра, обе части его изготавливаются цилиндрическими и в них вставляются футерующие детали из литой резины, образующие внутри конус. При футеровке гидроциклона предусматривается возможность изменения диаметров отверстий питания и разгрузочной насадки. Практически чаще футеруется только коническая часть гидроциклона, в особенности ее нижние детали, которые более всего подвержены износу. Крепление футерующих деталей осуществляется установкой в нижней зоне конуса специального зажимного кольца и плотным сочленением всей футеровки при стяжке отдельных деталей. В некоторых случаях применяются гидроциклоны, отлитые из износостойчивого, легированного никелем чугуна.

В процессах разделения материала в гидроциклоне важную роль играют форма и размеры отверстия питания. Исследования показали, что, при прочих равных условиях, эффективность классификации повышается с уменьшением размера отверстия питания. Практи-

чески диаметр отверстия питания бывает в 2—4 раза меньше диаметра сливного отверстия. Часто гидроциклоны изготавливаются с регулируемым размером отверстия питания. Регулировка обычно осуществляется установкой в питающий патрубок пластинок или сопла (рис. 2).

Питающая насадка состоит из двух частей: вводного патрубка 1 и питающего патрубка 2. Регулировка сечения питающего отверстия осуществляется при помощи набора сменных пластинок 3, которые вставляются в питающий патрубок и болтами прикрепляются к стенке насадки. Перемещением этих пластинок можно регулировать отверстие питания, изменяя ширину или ширину и высоту. При изменении только ширины отверстия сечение струи вводимой пульпы принимает форму прямоугольника. В случае регулировки отверстия питания пластинками в двух направлениях струя принимает квадратную форму.

Для удобства крепления сливного трубопровода к гидроциклону предусмотрена специальная сливная камера со сливным патрубком. Эта камера, так же как и коническая часть, прикрепляется фланцами к цилиндрической части гидроциклона, но с другого торца.

Мультициклон

Гидроциклоны изготавливаются различных диаметров от 10 до 700 мм и более. Наибольшее распространение получил гидроциклон диаметром 100—500 мм. Однако в ряде случаев предпочитают применять гидроциклоны меньшего диаметра, так как при этом повышается точность разделения.

Серия малых гидроциклонов, образующих одну батарею, которая питается от общего пульпопровода, представляет собой агрегат, называемый мультициклоном. Количество гидроциклонов в батарее может достигать до нескольких сот штук. Известны случаи, когда мультициклон состоит из двухсот гидроциклонов диаметром 20 мм. Гидроциклоны малых размеров изготавливаются из металла, коррозионноустойчивых

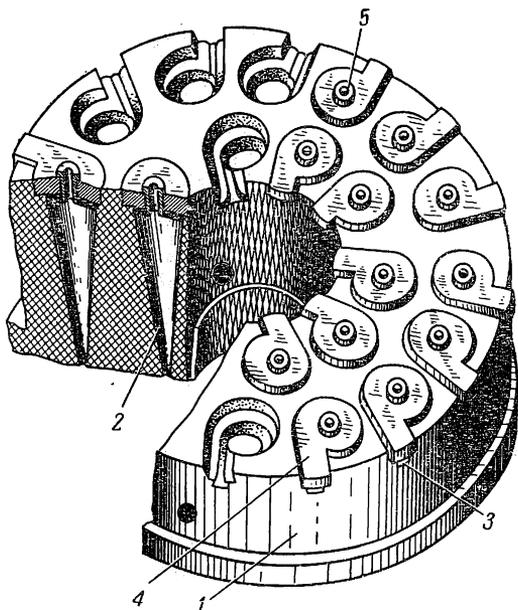


Рис. 3. Общий вид мультициклона:
1 — корпус из резины; 2 — конус гидроциклона;
3 — отверстие подачи; 4 — крышка из резины;
5 — сливная металлическая трубка

материалов, а также различных прессованных материалов и резины.

На рис. 3 показан общий вид мультициклона, расположенного в резиновом блоке, а на рис. 4 — деталь мультициклона с малыми циклонами, вырезанными в прессованном материале.

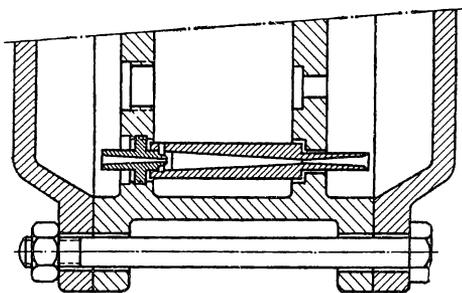


Рис. 4. Деталь мультициклона с малыми циклонами в блоке из прессованного материала

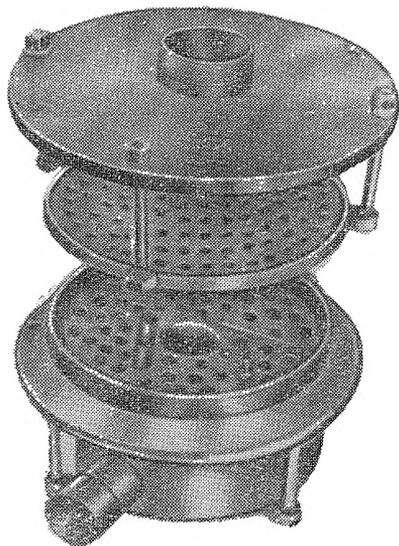


Рис. 5. Общий вид батарейного гидроциклона, расположенного в сборном металлическом блоке

Часто батарейные гидроциклоны изготавливаются в виде собранного корпуса со вставленными в него гидроциклонами. Для изготовления корпусов также широко применяется резина.

На рис. 5 показан общий вид такого батарейного гидроциклона с 88 циклонами диаметром 10 мм, предназначенного для одностадийной обработки материала.

На рис. 6. изображен трехъярусный батарейный гидроциклон, состоящий из циклонов диаметром 15 мм по 24 в каждом ярусе.

На рис. 7 показан общий вид опытного батарейного гидроциклона БГЦ-2, разработанного быв. Всесоюзным научно-исследовательским институтом по обогащению и брикетированию углей (ВНИИУглеобогащение). Он предназначен для сгущения шламов и осветления моченых вод на углеобогащительных фабриках. Батарея состоит из шести циклонов диаметром 300 мм с углом конусности 12°. Общая высота батареи 1612 мм. Размеры приемного отверстия изменяются при помощи сменных вкладышей. Диаметр сменных насадок для выпуска сгущенного продукта и осветленной воды равен 100, 75, 50 и 25 мм.

Рабочее давление поступающих шламовых вод 2 атм. Производительность батареи гидроциклонов составляет по питанию 300 м³/ч при размерах питающего отверстия 100 × 75 мм.

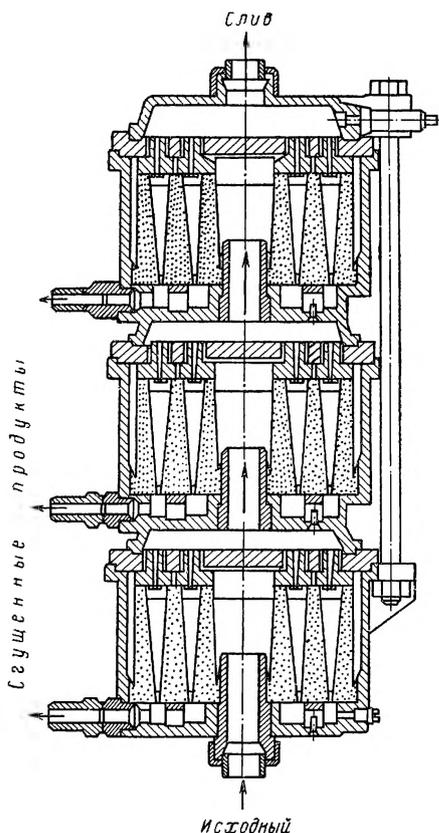


Рис. 6. Трехъярусный батарейный гидроциклон

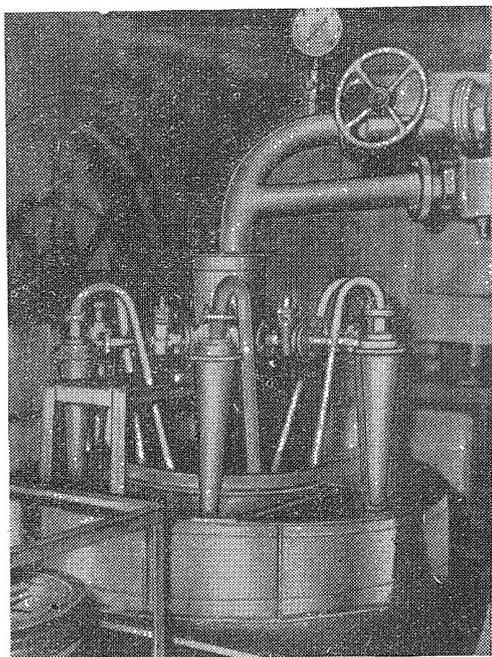


Рис. 7. Общий вид батарейного гидроциклона БГЦ-2 конструкции ВНИИУглеобогашения

Трехпродуктовый гидроциклон

Трехпродуктовый гидроциклон (рис. 8) представляет собой обыкновенный гидроциклон, в сливную трубку которого вставлен патрубок значительно меньшего диаметра. Из гидроциклона часть внутреннего потока жидкости выходит через кольцевое пространство, образованное между сливной трубкой и патрубком, а остальное количество — через сливной патрубок.

Вследствие вращательного движения жидкости более крупные или тяжелые частицы сливного продукта попадают в кольцевое пространство, а мелкие или легкие выносятся через внутренний патрубок. Таким образом, при обработке угля в таком гидроциклоне, называемом трехпродуктовым, можно выделить три продукта:

нижний (тяжелый) и два верхних, из которых один обычно является промпродуктом.

На практике в сливную трубку чаще вставляют патрубок не для получения трех конечных продуктов обогащения, а для регулировки процесса при выделении двух продуктов. В этом случае продукт, выходящий через кольцевое пространство, возвращается в циркуляцию в тот же гидроциклон.

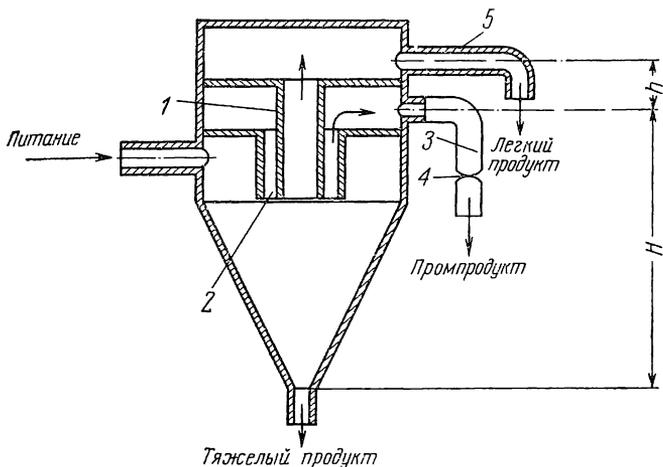


Рис. 8. Трехпродуктовый гидроциклон:

1 — сливной патрубок; 2 — кольцевое пространство; 3 — резиновый шланг; 4 — зажим; 5 — сливная труба

Трехпродуктовый гидроциклон может быть использован как для классификации материала, так и для обогащения.

Разработка конструкции трехпродуктового гидроциклона потребовала дополнительного изучения характера потоков жидкости. Экспериментально установлено, что внутренний поток жидкости движется по внутренней поверхности сливной трубки относительно тонким слоем. Здесь жидкость образует как бы полый цилиндр, внутренняя поверхность которого ограничена воздушным столбом. Чем больше давление питания, тем толще слой жидкости.

Гидроциклон винтовой формы

Для уменьшения сопротивления от трения между поверхностью гидроциклона и внешними слоями потока жидкости, движущегося вниз по спирали, разработана конструкция гидроциклона, внутренняя поверхность которого имеет винтовую форму (рис. 9).

К гидроциклонам этого типа относится сепаратор «Тедман», который рекомендуется для разделения материала по крупности в пределах от 3 до 0,1 мм.

Сепаратор «Тедман» (рис. 10) состоит из горизонтального цилиндра с винтовой внутренней поверхностью, к которому с двух концов

прикреплены усеченные конусы. В суженных концах конусов имеются насадки для разгрузки продуктов разделения.

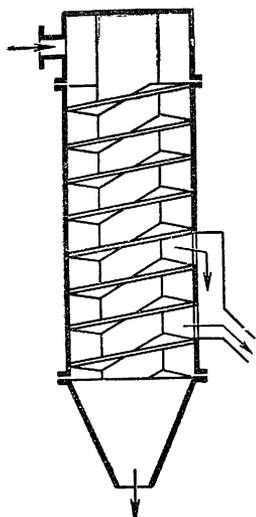


Рис. 9. Гидроциклон винтовой формы

В цилиндрическую часть подаются тангенциально пульпа, содержащая материал, подлежащий классификации, и отдельно дополнительная вода, служащая для усиления классифицирующего действия сепаратора. Изменением количества и давления дополнительной воды можно регулировать разделение материала.

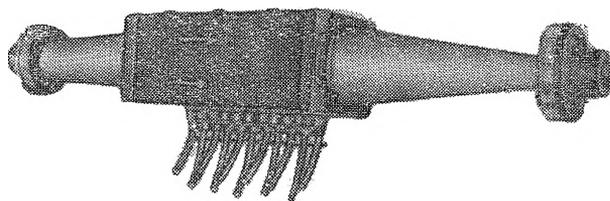


Рис. 10. Общий вид центробежного сепаратора «Тедман»

Центриклон (турбоциклон)

Конструкция центриклона (рис. 11) принципиально не отличается от конструкции обычного гидроциклона. Однако в центриклоне необходимый папор для работы создается не насосом, как у гидроциклона, а турбинкой, расположенной в цилиндрической части аппарата. Наличие вращающейся с большой скоростью турбинки является серьезным усложнением конструкции.

При конструировании центриклона предполагалось, что замена насоса турбинкой снизит удельный расход электроэнергии. Практически это предположение не подтвердилось и центриклоны не получили широкого распространения. Они нашли применение преимущественно на небольших обогатительных фабриках. На средних и крупных фабриках предпочитают устанавливать обычные гидроциклоны, которые значительно проще и дешевле в изготовлении.

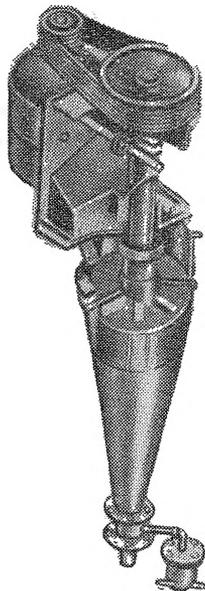


Рис. 11. Центриклон (турбоциклон)

Гидроциклон с открытым верхом

Схема гидроциклона с открытым верхом конструкции Дальстрома показана на рис. 12. Гидроциклон состоит из цилиндрической (с открытым верхом) и конической части, у вершины которой имеется разгрузочная насадка. Питание подается тангенциально в цилиндрическую часть гидроциклона, а слив удаляется через его боковую стенку, расположенную на половине высоты. Кроме того, изготавливаются гидроциклоны с открытым верхом, у которых питающий патрубок присоединен к конической части на разной высоте.

Имеются гидроциклоны с открытым верхом без специального сливного патрубка. В этом случае верхний продукт удаляется через сливной порог с кольцевым желобом. Гидроциклоны с открытым верхом работают при очень низких давлениях, что является их достоинством. Максимальное давление гидроциклона этого типа, имеющего диаметр 762 мм в цилиндрической части, составляет 0,5 м водяного столба.

Рис. 12. Гидроциклон с открытым верхом

Гидроциклон с открытым верхом применяется для классификации материала по более широкой шкале, чем обычные гидроциклоны.

Комбинированный гидроциклон

Комбинированный гидроциклон (рис. 13) состоит из двух гидроциклонов — наружного и внутреннего. Обрабатываемая пульпа подается тангенциально в наружный гидроциклон и, попадая в канал между двумя циклонами, вращаясь в нем, спускается вниз к разгрузочной насадке.

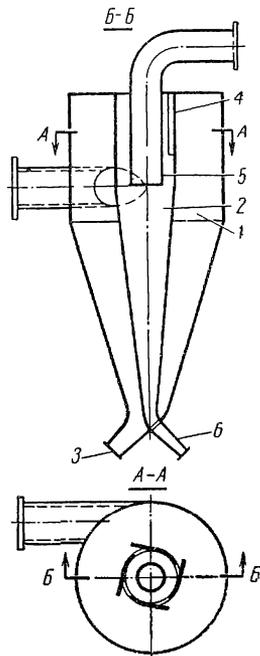


Рис. 13. Комбинированный гидроциклон для стадийной классификации и сгущения:

1 — наружный гидроциклон; 2 — внутренний гидроциклон; 3 — песковая насадка наружного циклона; 4 — тангенциальные сопла для питания внутреннего гидроциклона; 5 — сливной патрубок; 6 — песковая насадка внутреннего гидроциклона

Из верхней зоны наружного циклона часть пульпы, в которой содержатся мелкие фракции обрабатываемого продукта, попадает во внутренний циклон через щели, расположенные тангенциально в его верхней цилиндрической части. Во внутреннем циклоне пульпа тоже приобретает вращательное движение и в поле центробежной силы происходит вторичная очистка. Мелкий (осветленный) продукт выносятся через верхнее сливное отверстие гидроциклона. Наиболее тяжелый (сгущенный) продукт разгружается через нижнюю насадку наружного циклона, из нижней же насадки внутреннего циклона выходит промежуточный продукт. Недостатком этого гидроциклона является значительная энергоемкость.

Комбинированный гидроциклон предназначен для классификации материала и сгущения шлама.

Компаунд-гидроциклон

Эффективность обогащения в гидроциклоне определяется временем пребывания угля в нем. Вследствие уменьшения угла конусности увеличивается емкость гидроциклона и обрабатываемый материал находится в аппарате более продолжительное время, что может привести к повышению эффективности обогащения. Поэтому возникла необходимость в создании гидроциклона с конической частью, состоящей из трех деталей с разными углами конусности. Такой аппарат был сконструирован в Канаде и назван компаунд-гидроциклоном (рис. 14).

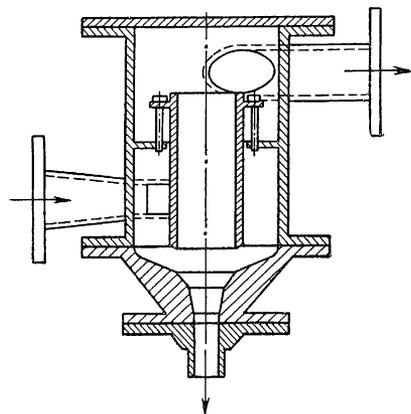


Рис. 14. Компаунд-гидроциклон

Компаунд-гидроциклон предназначен для обогащения угля в водной среде в три стадии.

Внутренняя поверхность конической части этого гидроциклона разделена на три секции с углами конусности: верхнюю — 135° , среднюю — 75° , нижнюю — 20° .

В верхней секции конической части происходит разделение крупных легких зерен, которые восходящим потоком выносятся наверх через сливное отверстие. Промпродуктовая фракция переходит в среднюю секцию, где выделяются в сливной продукт более легкие фракции, а остальной материал, содержащий крупные тяжелые зерна с вовлеченными мелкими частицами, опускается в нижнюю секцию конуса. В третьей секции, имеющей наименьший угол конусности,

постель является более разрыхленной, и поэтому разделение происходит главным образом по крупности. Мелкие частицы уносятся восходящим потоком во вторую секцию конуса для повторного обогащения.

Полагают, что такая конструкция гидроциклона повышает эффективность обогащения угля всех классов крупности. Испытания опытно-промышленной установки показали, что в компаунд-гидроциклоне эффективно обогащается мелкий уголь (0—3 мм) при высокой плотности разделения. Нижний предел крупности эффективно обогащаемого угля — 0,1 мм.

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

1. ПОТОКИ ЖИДКОСТИ И ХАРАКТЕР ИХ ДВИЖЕНИЯ

В гидроциклоне образуется два потока жидкости: внешний — нисходящий и внутренний — восходящий (рис. 15).

В периферической зоне поток жидкости, вращаясь с большой скоростью, опускается спирально по стенке и стремится к вершине конуса гидроциклона, образуя внешний нисходящий поток. Небольшая часть жидкости выходит из гидроциклона через отверстие насадки, основное же количество жидкости изменяет направление и, образуя внутренний восходящий поток, поднимается к основанию конуса и покидает гидроциклон через сливное отверстие. По мере перемещения внешнего потока к вершине конуса от него отделяется часть жидкости, которая, двигаясь в радиальном направлении, вливается во внутренний поток. Движение жидкости в радиальном направлении имеет волнообразный характер с варьирующей амплитудой на различных уровнях. Режим движения жидкости в гидроциклоне — турбулентный. Вращение от периферии внутрь передается диффузией и действием вращающего момента сил вязкости, а также с помощью перемещения самой завихренной жидкости.

При работе гидроциклона в него через отверстие у вершины конуса засасывается значительное количество воздуха, который вместе с воздухом, выделившимся из воды, образует воздушный столб вдоль оси гидроциклона по всей его длине. Восходящий поток жидкости с внутренней стороны ограничивается воздушным столбом.

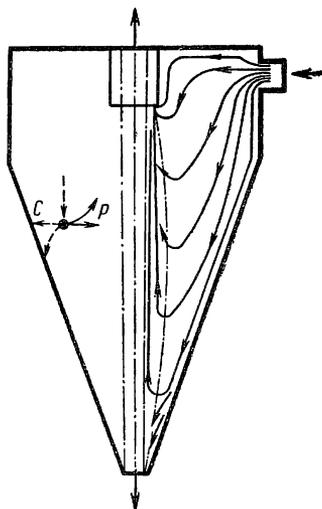


Рис. 15. Схема движения потоков жидкости и сил, действующие в гидроциклоне:

C — центробежная сила; P — сила давления радиального потока

Форма и размеры воздушного столба зависят от ряда факторов, основными из которых являются величина давления, диаметры сливного отверстия и разгрузочной пасажки. Образование воздушного столба в гидроциклоне связано с понижением давления внутри потока в результате быстрого вращения жидкости.

Таким образом, в гидроциклоне, кроме двух основных вращающихся потоков жидкости — внешнего и внутреннего, имеется также воздушный поток в виде воздушного столба. Линия потоков жидкости в гидроциклоне направлена по логарифмической спирали. Внешний поток ограничивается стенкой гидроциклона и внешней поверхностью внутреннего потока. На границе между внешним и внутренним потоками происходит резкое изменение направлений движения жидкости, появляются срезающие скорости. Описанная схема дает лишь приближенное, весьма упрощенное представление о реальном движении жидкости в гидроциклоне. В действительности наряду с круговыми потоками жидкости возникают радиальные, циркуляционные и вертикальные токи, совокупность которых сильно усложняет приведенную схему.

Основной процесс разделения зерен в гидроциклоне происходит во внешнем потоке. Частицы, попавшие во внутренний поток, в большинстве случаев выносятся через сливное отверстие. Поэтому с практической точки зрения наибольший интерес представляет изучение кинематики жидкости и минеральных зерен во внешнем потоке.

2. СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Скорость движения жидкости в каждой точке гидроциклона может быть разложена на следующие три составляющие:

1) тангенциальную скорость v_t , направленную перпендикулярно радиусу вращения в данной точке на горизонтальной плоскости;

2) радиальную скорость u , направленную вдоль радиуса гидроциклона;

3) вертикальную скорость w , направленную под прямым углом к двум первым составляющим скорости.

Для регулировки технологического процесса в гидроциклоне важно знать соотношение тангенциальной и радиальной скоростей движения, так как разделение минеральных зерен происходит в основном под действием центробежной силы и сопротивления радиального потока жидкости, величины которых определяются этими составляющими скоростями.

Величины тангенциальной и радиальной скоростей движения потоков изменяются в зависимости от радиуса гидроциклона. Для установления этой зависимости проведен ряд аналитических и экспериментальных исследований. Из аналитических исследований значительную ценность представляют работы, выполненные М. Дриссеном, Х. Крайнером, Л. Деметером, Г. Тарьяном и другими. Наи-

более полное экспериментальное исследование кинематики жидкости в гидроциклоне проведено Келсаллом.

Результаты изучения движения жидкости в гидроциклоне приводятся в работах А. И. Поварова, Л. М. Витренко, Г. П. Питерских, В. М. Борисова, А. И. Ангелова, Ф. Фонтейна, К. Диксмана, Ц. Крийгсмана, Э. Бердхольда и других советских и зарубежных исследователей.

Наиболее детальное исследование теоретических вопросов, связанных с процессами, происходящими в циклонах, проводил М. Дриссен [32]. Он рассматривал вихревое движение жидкости в циклоне, сечение которого ограничено двумя воображаемыми параллельными плоскостями, перпендикулярными оси циклона. Допуская, что во всех параллельных сечениях, лежащих выше и ниже рассматриваемого, истечение будет тождественным, т. е. вертикальная составляющая скорости $w = 0$, Дриссен применил дифференциальные уравнения Навье — Стокса для вязкой несжимаемой жидкости имеющей постоянную плотность $\rho = \text{const}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v_t}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v_t^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu_1; \\ \frac{\partial v_t}{\partial t} + u \frac{\partial v_t}{\partial r} + \frac{v_t}{r} \frac{\partial v_t}{\partial \varphi} + w \frac{\partial v_t}{\partial z} + \frac{uv_t}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} + \nu_2; \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v_t}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где v_t , u , w — соответственно тангенциальная, радиальная и вертикальная составляющие скорости;

r , φ — полярные координаты на плоскости при $z = \text{const}$;

ρ — плотность среды;

t — время;

p — давление (статическое);

ν_1 , ν_2 , ν_3 — вязкости среды.

Полагая, что в циклоне имеет место установившееся вращательное движение жидкости, симметричное, относительно оси, Дриссен значительно упростил уравнение (1) и для рассматриваемого сечения в двухмерном циклоне получил

$$v_t = \frac{C}{n+1} r^n + \frac{C_1}{r}. \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что тангенциальная скорость v_t в циклоне является функцией только радиуса вращения r .

На основании данных измерения статического давления в различных точках цилиндрического циклона Дриссен определил тангенциальные скорости расчетным путем по формуле

$$\frac{v_t^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr}, \quad (3)$$

где v_t — тангенциальная скорость;
 ρ — плотность среды;
 p — давление;
 r — радиус вращения.

Сравнивая величины тангенциальной скорости, полученные по формулам (2) и (3), Дриссен пришел к заключению, что при $n = -1$ они совпадают.

Крайнер [37], суммируя силы, действующие на элементарный объем жидкости в гидроциклоне и обусловленные изменениями моментов сил жидкости, пересекающей рассматриваемый элемент, а также тангенциальными усилиями, пришел (так же, как и Дриссен для аэроциклона) к уравнению Навье — Стокса, которое в системе прямоугольных координат имеет следующий вид:

$$u \left(\frac{v_t}{r} + \frac{\partial v_t}{\partial r} \right) = \nu' \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial v_t}{\partial r} + \frac{v_t}{r} \right). \quad (4)$$

Приняв коэффициент, характеризующий вязкость среды, $\nu' = 1$, Крайнер после некоторого преобразования интегрировал уравнение (4) и нашел следующую зависимость v_t от r :

$$\frac{v_t}{v_{t_1}} = \frac{r_1}{r} \left(1 + \frac{2}{2 - \frac{C}{\nu}} \right) \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^{2 - \frac{C}{\nu}} - 1 \right], \quad (5)$$

где ν — кинематическая вязкость жидкости;
 C — постоянная величина.

При этом

$$C = \frac{Q}{2\pi r L}, \quad (6)$$

где Q — количество общего потока жидкости, проходящей через гидроциклон;
 L — длина воздушного столба.

Анализ уравнения (5) показывает, что при условии приближения кинематической вязкости к нулю, т. е. когда

$$\frac{C}{\nu} \rightarrow \infty, \quad v_t r = v_{t_1} r_1 = \text{const}, \quad (7)$$

а при $\frac{C}{\nu} \rightarrow 0$

$$\frac{v_t}{r} = \frac{v_{t_1}}{r_1} = \omega = \text{const}, \quad (8)$$

где ω — угловая скорость вращения.

Но так как для жидкости не может быть $\frac{C}{\nu} \rightarrow 0$, то в гидроциклоне невозможно вращение жидкости с постоянной угловой скоростью.

Для идеальной жидкости справедливо уравнение (7), которое также не применимо для реальной жидкости. По-видимому, зависимость между v_t и r для движения жидкости в гидроциклоне должна находиться между этими двумя граничными случаями.

Дриссен в ряде работ высказывал предположение, что распределение тангенциальных скоростей может характеризоваться уравнением

$$v_t r^n = \text{const.} \quad (9)$$

Для идеальных жидкостей показатель степени $n = 1$, а для воздушного вихря, по опубликованным данным, $n = 0,5 \div 0,8$. Крайнер с целью экспериментального подтверждения выведенной им зависимости между тангенциальной скоростью и радиусом вращения производил измерение давления в различных точках конического циклона с невысокой цилиндрической частью и расчетным путем определял тангенциальную скорость. На основании этих исследований он сделал выводы, которые сводятся к следующему:

1) тангенциальная скорость движения потока жидкости в гидроциклоне возрастает обратно пропорционально радиусу вращения, за исключением зоны, находящейся в непосредственной близости от оси гидроциклона, где тангенциальная скорость падает с уменьшением радиуса и превращается в нуль на оси гидроциклона;

2) радиальная скорость должна изменяться прямо пропорционально радиусу и превращаться в нуль на оси. Она должна также быть нулевой у стенки цилиндрической части гидроциклона;

3) в гидроциклоне существует определенная плоскость, выше которой жидкость поднимается и уходит через сливное отверстие. Жидкость, пересекающая эту плоскость, удаляется из гидроциклона через разгрузочную насадку.

Более обстоятельное экспериментальное исследование кинематики жидкости в гидроциклоне было проведено Келсаллом [38, 39]. Он вводил в водную среду, поступающую в гидроциклон, тонкие алюминиевые стружки, движение которых наблюдалось при помощи специального микроскопа. Объектив микроскопа мог вращаться в направлении движения алюминиевых частиц. Измерив время прохождения твердыми частицами определенного пути, Келсалл определял угол наклона траектории движения и затем вычислением определял скорость. Опыты Келсалла показали, что скорость движения алюминиевых частиц близка к скорости жидкости и расхождение между ними не превышает 5%. Изменение величины тангенциальной скорости в зависимости от радиуса на различных сечениях гидроциклона диаметром 76 мм, по данным Келсалла, показано на рис. 16. Тангенциальная скорость увеличивается при уменьшении радиуса вращения жидкости, достигая своего максимального значения в непосредственной близости к внутреннему восходящему потоку. Затем она резко уменьшается и на оси гидроциклона равна нулю.

Келсалл нашел, что показатель степени n в формуле $v_{\tau}^n = \text{const}$ уменьшается с уменьшением радиуса вращения потока жидкости. Наибольшее значение n получено им у стенки гидроциклона ($n = 0,52$). На радиусе воздушного столба $n = 0,3$. На основании проведенного экспериментального исследования Келсалл пришел к следующим выводам.

1. В области ниже конца сливной трубки между тангенциальной скоростью и радиусом вращения существует зависимость $v_{\tau}^n = \text{const}$, где показатель степени имеет положительное значение. В области выше конца сливной трубки зависимость $v_{\tau}^n = \text{const}$ не сохраняется, хотя характер изменения тангенциальной скорости мало отличается от такового для нижележащей зоны. Угол наклона траектории движения жидкости в любой точке внутри гидроциклона при прочих равных условиях не зависит от давления питания.

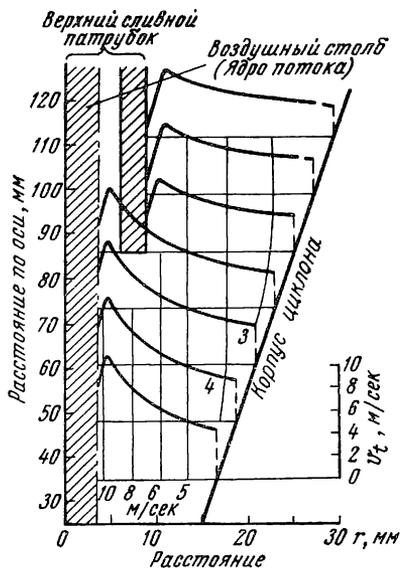


Рис. 16. Изменение тангенциальной скорости в гидроциклоне (по Келсаллу)

2. Вертикальная составляющая скорости движения жидкости в гидроциклоне изменяется следующим образом. Около конической стенки гидроциклона вертикальная скорость направлена вниз и имеет наибольшее значение. По мере перемещения жидкости в направлении к осевой части эта скорость уменьшается до нуля, а затем увеличивается по направлению вверх. Таким образом,

движение жидкости в радиальном направлении происходит как бы волнообразно. Если на каждом сечении гидроциклона соединить все точки, в которых вертикальная скорость равна нулю, то получим ряд окружностей, внутри которых жидкость движется вверх, а вне их направлена вниз, к насадке.

3. Радиальная скорость имеет наибольшее значение в непосредственной близости от стенки гидроциклона. По мере перемещения жидкости в направлении к оси радиальная скорость уменьшается. Радиальная скорость уменьшается с уменьшением радиуса в зонах, лежащих выше конца сливной трубки, и становится равной нулю вблизи сливной трубки, где жидкость, меняя свое направление, течет вверх и затем входит в поток повторной циркуляции. В самых нижних зонах, ближе к вершине конической части гидроциклона, радиальная составляющая скорости уменьшается до нуля у границ внутреннего восходящего потока.

Фонтейн и Диксман [35] также замерили давление в различных точках гидроциклона и определили тангенциальную скорость расчетным путём из уравнения

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{v_t^2}{r}, \quad (10)$$

где p — давление;

ρ — плотность жидкости;

v_t — тангенциальная скорость на радиусе r .

Тангенциальная скорость определялась ими также экспериментально визуальным наблюдением движения твердых частиц в гидроциклоне с помощью стробоскопа.

Авторы указывают, что величины тангенциальной скорости, найденные описанными выше двумя способами, совпадали. Фонтейн и Диксман предложили следующую зависимость между тангенциальной скоростью и радиусом вращения:

$$v_t = \frac{C_1}{r} + C_2 r, \quad (11)$$

где C_1 и C_2 — коэффициенты, зависящие от конструкции гидроциклона и числа Рейнольдса.

А. И. Поваров [27] экспериментально установил, что во внешнем потоке тангенциальная скорость сохраняется почти постоянной и имеет меньшую величину, чем скорость на вводе. Во внутреннем потоке эта составляющая скорости возрастает с уменьшением радиуса вращения и при малых диаметрах сливного отверстия она превышает скорость на вводе.

Тарьян [41, 42], анализируя уравнение (9), высказывает предположение, что величина показателя степени n определяется степенью турбулентности потока жидкости в гидроциклоне. При низкой турбулентности, соответствующей более низким скоростям ввода жидкости в гидроциклон, показатель степени приближается к 1, а при высокой турбулентности — к 0,5.

Тарьян вывел уравнение, выражающее зависимость между статическим давлением и радиусом вращения жидкости в гидроциклоне,

$$H = H_k - \frac{H_{vk}}{n} \left[\left(\frac{r_k}{r} \right)^{2n} - 1 \right], \quad (12)$$

где H и H_k — соответственно величины статического напора на радиусе r у входа в гидроциклон;

H_{vk} — скорость напора на входе;

r_k — радиус в цилиндрической части гидроциклона.

Он высказывает предположение, что n является функцией давления.

Тужон [44], интегрируя основное дифференциальное уравнение Новье — Стокса, нашел уравнение, выражающее зависимость тангенциальной скорости от радиуса,

$$v_t = \frac{C_1}{2 - \frac{C}{v}} r^2 - \frac{C}{v} + C_2, \quad (13)$$

где C_1 и C_2 — постоянные величины;
 v — коэффициент вязкости.

При определенных граничных условиях это уравнение преобразуется в формулу

$$v_t r^n = \text{const.} \quad (14)$$

В отличие от Дриссена, Крайнера, Тарьяна и других исследователей Деметер [31] представляет движение потока жидкости в гидроциклоне как вынужденное, несимметричное относительно оси движения. Он считает, что изменение тангенциальной скорости в зависимости от радиуса не происходит по уравнению $v_t r^n = \text{const.}$ По мнению Деметера, тангенциальная скорость в гидроциклоне является постоянной величиной.

Для определения этой скорости на основании уравнения Бернулли Деметер вывел следующую формулу:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2gH}{1 + 2 \ln \frac{R_k}{R_b}}}, \quad (15)$$

где v_0 — скорость жидкости у входа в гидроциклон;
 R_k и R_b — соответственно внешний и внутренний радиусы потока жидкости в гидроциклоне.

Тарьян, исходя из уравнения (6), получил формулу для определения радиальной скорости в гидроциклоне

$$u = \frac{v_t d_e^2}{8Lr}, \quad (16)$$

где v_t — тангенциальная скорость;
 d_e — диаметр отверстия питания.

В более поздних работах Тарьян приводит следующую зависимость для определения радиальной скорости движения жидкости:

$$ur [h_1 + (r_1 - r) \text{ctg } \alpha] = C, \quad (17)$$

где h_1 — высота цилиндрической части;
 $(r_1 - r) \text{ctg } \alpha = h$ — высота конической части на радиусе r ;
 α — половина угла конусности.

Из этой зависимости следует, что кривая изменения радиальной скорости есть парабола, кривизна которой изменяется в зависимости

от h_1 и α . Тарьян пришел к выводу, что радиальная скорость имеет минимальное значение на радиусе $r = \frac{h_1 + r_1 \operatorname{ctg} \alpha}{2 \operatorname{ctg} \alpha}$ и не может быть величиной отрицательной или равной нулю.

По данным Келсалла, радиальная скорость изменяется по высоте гидроциклона. На горизонтальных уровнях, выше конца сливной трубки, радиальная скорость, направленная внутрь, имеет наибольшее значение вблизи стенки гидроциклона и уменьшается по мере движения жидкости в осевую зону.

Вертикальные скорости изменяются как по величине, так и по направлению в зависимости от радиуса вращения. В зоне, лежащей выше конца сливной трубки, вертикальная скорость вблизи стенки гидроциклона имеет наибольшее значение и направлена вниз. По мере уменьшения радиуса вращения жидкости вертикальная скорость уменьшается и на некотором расстоянии становится равной нулю. С этого места жидкость поднимается вверх, и скорость, направленная вверх, растет до максимального значения вблизи сливной трубки. Ниже конца этой трубки вертикальная скорость также направлена вниз и имеет у стенок гидроциклона наибольшее значение. Здесь скорость снова начинает уменьшаться с приближением жидкости к оси гидроциклона, а затем на некотором расстоянии, изменив направление вверх, увеличивается, достигая максимального значения у границы воздушного столба.

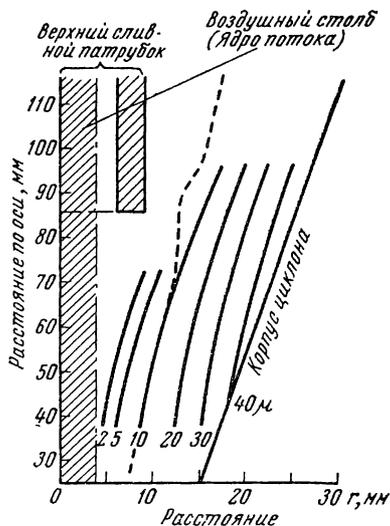


Рис. 17. Линии нулевой вертикальной скорости в гидроциклоне

Геометрическое расположение точек ниже конца сливной трубки, где наблюдается нулевая вертикальная скорость, образует воображаемую фигуру, внутри которой вся жидкость движется вверх, а вне ее направлена вниз (рис. 17).

Тарьян [42], анализируя кривые изменения вертикальных скоростей, полученные Келсаллом, сделал следующие выводы:

а) линии постоянных вертикальных скоростей ($w = \text{const}$) в конической части гидроциклона образуют пучок, расходящийся от вершины конуса;

б) вдоль оси и вблизи сливной трубки линии постоянных вертикальных скоростей потока жидкости почти параллельны оси гидроциклона;

в) у стенки конической части гидроциклона линии $w = \text{const}$ образуют с его осью угол, несколько больший, чем α ;

г) между тангенциальной и вертикальной скоростями существует приближительная зависимость

$$w = v_t \operatorname{ctg} \alpha; \quad (18)$$

д) линия $w = 0$ делит поток жидкости в гидроциклоне на два потока: внешний, направленный вниз, и внутренний, направленный вверх, и образует с осью гидроциклона угол, меньший, чем α .

Угловая скорость потока жидкости в гидроциклоне, так же как и тангенциальная, является переменной величиной, значение которой увеличивается от уменьшения радиуса.

Следует упомянуть также работу Бертхольда, который, в отличие от других исследователей, рассматривая зависимость тангенциальной скорости от радиуса вращения, полагал, что эта зависимость различна на разных горизонтальных уровнях гидроциклона. Не располагая необходимым экспериментальным материалом, он использовал данные исследований Дриссена, Келсалла и других и установил, что показатель степени n в формуле (9) изменяется на разных уровнях гидроциклона.

В связи с проведением исследования по классификации тонкоизмельченных рудных материалов в гидроциклоне А. И. Поваров рассмотрел вопрос о характере движения жидкости. Он изучал кинематическую структуру движения потока в стеклянных моделях гидроциклонов введением в поток окрашенной жидкости и бахромы из ниток, подвешенных на проволоке.

На основании этих опытов А. И. Поваров повторил выводы прежних исследователей о наличии в гидроциклоне двух потоков, вращающихся в одну и ту же сторону.

По мнению А. И. Поварова, в результате противоположно поступательного движения двух концентрически вращающихся потоков между ними возникает замкнутый кольцевой вихрь, так называемая «мертвая зона». Определяя размеры центрального потока жидкости в гидроциклоне, А. И. Поваров приходит к выводу, что внешний диаметр его ограничен диаметром сливного отверстия, внутренний диаметр и высота, так же как скорость вращения и шаг его винтового движения, зависят от соотношения геометрических размеров гидроциклона и давления питания.

Замер окружной скорости движения потока жидкости в гидроциклоне проводился А. И. Поваровым при помощи гидрометрической вертушки, вводимой в коническую часть гидроциклона через плоскую крышку цилиндрической части и сливную трубку.

Выводы этих исследований сводятся к следующему:

1) характер изменения тангенциальной скорости не отвечает ни закону динамического вращения, ни условию постоянства тангенциальной скорости;

2) в уравнении $v_t^n = \operatorname{const}$ показатель степени n изменяется в пределах от 1 до 0;

3) наименьшая тангенциальная скорость получена на диаметре около 100—200 мм, который соответствует «мертвой зоне»;

4) во внешнем потоке тангенциальная скорость сохраняется почти постоянной и по величине меньше, чем скорость на входе в гидроциклон;

5) во внутреннем потоке тангенциальная скорость возрастает по направлению к оси гидроциклона, но при сравнительно малом диаметре сливного отверстия она превышает скорость на входе.

В. М. Борисов и А. И. Ангелов [26] изучали распределение тангенциальной скорости по радиусу вращения в гидроциклоне, применив метод измерения давления внутри потока жидкости введением в него гидрометрической трубки. Они измеряли полное давление трубкой Пито и статическое давление пьезометрической трубкой, рассчитывали величину тангенциальной скорости по известной формуле, выведенной из уравнения Бернулли, и сделали вывод, что величина тангенциальной скорости в пределах точности измерений мало зависит от высоты гидроциклона.

Метод анализа, примененный Дриссенем, Гринером, Тарьяном и Дальстромом, основанный на математических расчетах дает принципиальную сущность, основные тенденции в характере изменения скоростного поля в гидроциклоне. Однако он не дает правильного представления о движении потока реальной жидкости в гидроциклоне. Существующее представление о характере изменения окружной скорости и зависимости между этой скоростью и радиусом вращения при $n = 0,2 \div 0,8$ справедливо только лишь для частного случая и не распространяется на гидроциклоны всех конструктивных размеров.

Решение вопроса о характере изменения скоростей в гидроциклоне требовало проведения тщательных экспериментальных исследований, которые были осуществлены в ИГД им. А. А. Скочинского и в Институте горючих ископаемых [5, 9].

Для измерения тангенциальной скорости движения воды в гидроциклоне, а также для изучения кинематической характеристики был применен простой и распространенный метод измерения давления в соответствующих точках при помощи трубки Прандтля и дифференциального манометра. При этом измерялось давление в гидроциклоне вдоль его радиуса на разных горизонтальных уровнях. Этот метод измерения совместно с фотографированием позволил исследовать характер потоков и изменение скоростей жидкости в гидроциклоне. Измерения проводились в прозрачной модели гидроциклона (рис. 18) диаметром (в цилиндрической части) 80 мм. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 19.

Гидроциклон имел набор сменных разгрузочных насадок и сливных трубок, различные сочетания которых применялись при измерениях. Давление питания изменялось в пределах от 0,5 до 3 *атм*. Температура воды поддерживалась постоянной (в пределах 18—20° С).

Было исследовано влияние размеров сливного патрубка, отверстий разгрузочной насадки, питающей трубки, угла конусности и давления питания.

Для измерения давления применялась обычная гидрометрическая трубка Прандтля, изготовленная из двух шприцевых игл с внутренним диаметром 1,1 мм, одна из которых представляет собой обычный пьезометр, показывающий пьезометрическое давление (p/ρ), а другая, изогнутая под прямым углом подобно трубке Пито, служит для измерения величины полного напора ($p/\rho + v^2/2g$)

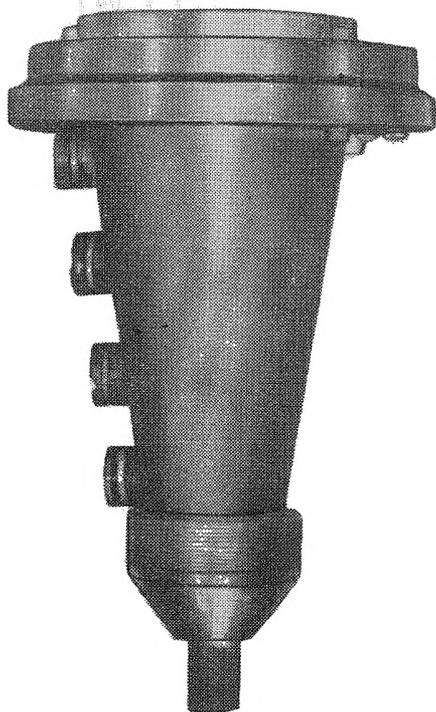


Рис. 18. Прозрачная модель гидроциклона

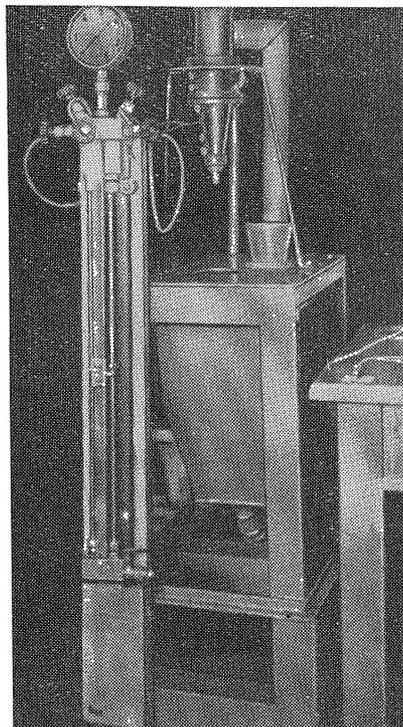


Рис. 19 Общий вид экспериментальной установки для определения скоростей движения потока жидкости в гидроциклонае

Концы трубок присоединялись резиновыми шлангами к дифференциальному манометру. Гидрометрическая трубка вводилась в движущийся поток жидкости через отверстия, имевшиеся на различных уровнях в боковой стенке цилиндрической и конической частей гидроциклона. Измерения проводились в шести горизонтальных сечениях, проходящих через отверстия, отмеченные на рис. 20 буквами *a, б, в, г, д, е*. Гидрометрическую трубку можно было передвигать вдоль оси отверстия и таким образом производить измерения на различных радиусах гидроциклона.

Величина тангенциальной скорости рассчитывалась по формуле, полученной из известного уравнения Бернулли,

$$v_t = \varphi \sqrt{2gH \left(\frac{\rho_1}{\rho} - 1 \right)}, \quad (19)$$

где ϕ — поправочный коэффициент, определяемый опытным путем и обычно равный 1—1,04. В практических расчетах этим коэффициентом пренебрегают;

g — ускорение силы тяжести;

H — разность уровней в коленях дифференциального манометра;

ρ_1, ρ — соответственно плотности воды и промежуточной жидкости (ртути).

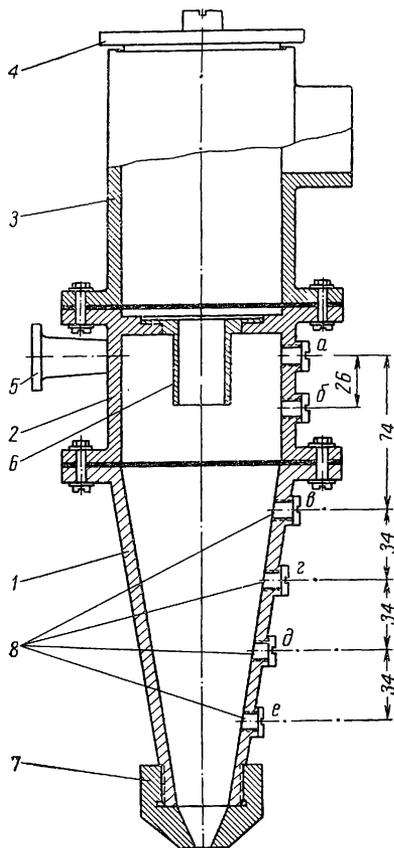


Рис. 20. Схема модели гидроциклона:

1 — коническая часть; 2 — цилиндрическая часть; 3 — сливная камера; 4 — крышка; 5 — питающий патрубок; 6 — сливная трубка; 7 — насадка; 8 — отверстия для измерений; а, б, в, г, д, е — горизонтальные сечения

Характер распределения давления в гидроциклоне показан на рис. 21. Видно, что общее давление p , имея максимальное значение у стенки гидроциклона, понижается с уменьшением радиуса. У границы воздушного столба общее давление примерно в семь раз меньше, чем у стенки гидроциклона.

Динамическое давление также понижается по мере приближения

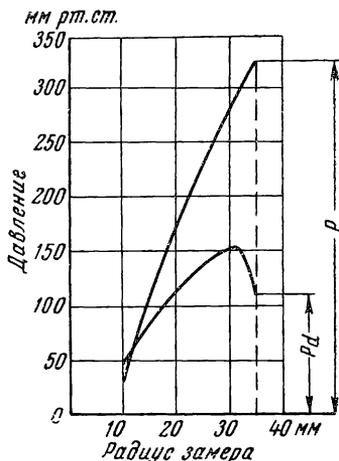


Рис. 21. Характер распределения давления в гидроциклоне:

p — общее давление; p_d — динамическое давление

потока к осевой зоне. Некоторое понижение p_d у стенки гидроциклона объясняется трением.

Общее давление в конической части гидроциклона (у стенки) по сравнению с давлением на входе понизилось в два раза.

На рис. 22 показано изменение потери напора в гидроциклоне в зависимости от отношения диаметров сливного и входного отверстий. На этом рисунке можно видеть, что с увеличением диаметра

сливного отверстия потеря напора резко возрастает. Давление потока жидкости в сливном патрубке гидроциклона при отношении диаметров сливного d_0 и входного d_e отверстий, равном 2, не превышает 20% от давления питания.

Скоростной напор также изменяется вдоль радиуса гидроциклона, однако характер этих изменений несколько иной, чем изменение общего давления. При максимальном значении вблизи стенки гидроциклона скоростной напор понижается с уменьшением радиуса гидроциклона, но медленнее, чем общее давление. Некоторое понижение скоростного напора у стенки гидроциклона

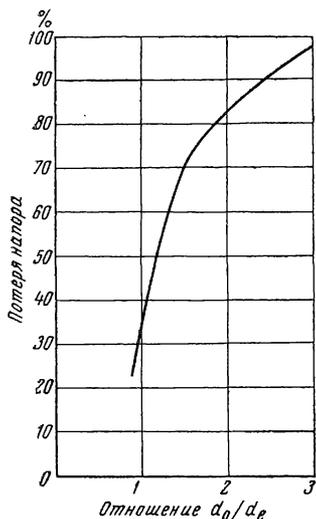


Рис. 22. Изменение потери напора в гидроциклоне при различных отношениях диаметров сливного d_0 и входного d_e — отверстий

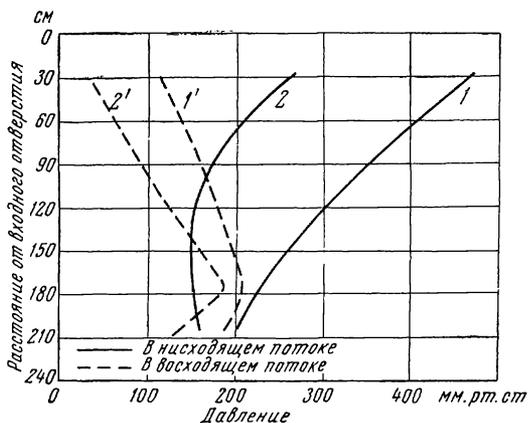


Рис. 23. Характер изменения давления по высоте гидроциклона:

1, 1' — общее давление; 2, 2' — динамическое давление

является, по-видимому, следствием трения вращающейся жидкости о стенки аппарата, а также кавитации, которая наступает при значительном падении общего давления и резкой перемене направления движения потока жидкости.

Характер изменения давления по высоте гидроциклона показан на рис. 23, откуда видно, что с увеличением расстояния от входного отверстия общее давление резко понижается, в то время как динамическое давление изменяется несущественно. В зоне восходящего потока жидкости с увеличением расстояния от входного отверстия в одинаковой степени повышаются общее и динамическое давления, а вблизи разгрузочной насадки, где вращение жидкости резко замедляется, они падают.

Характер изменения тангенциальной скорости воды в гидроциклоне диаметром 80 мм при различных давлениях на входе показан на рис. 24, а результаты измерения приведены в табл. 1.

По этим данным видно, что характер изменения тангенциальной скорости вдоль радиуса гидроциклона остается одинаковым при

Тангенциальные скорости воды в гидроциклоне при различных давлениях на входе (диаметр гидроциклона 80 мм, диаметр сливного отверстия 35 мм и разгрузочной насадки 20 мм)

Радиус точки измерения, мм	Давление, ати			
	2,2	1,2	0,8	0,5
<i>Цилиндрическая часть</i>				
40	9,4	5,4	4,6	4,1
35	9,6	8,7	6,5	4,9
30	7,9	6,6	4,9	3,6
25	7,3	5,4	4,1	2,8
20	6,9	4,4	4,1	2,6
<i>Коническая часть</i>				
35	7,7	5,1	4,6	3,3
32	8,4	6,3	5,1	4,3
30	8,5	6,5	5,4	4,1
25	8,4	6,3	4,9	4,1
20	7,5	5,6	4,6	3,6

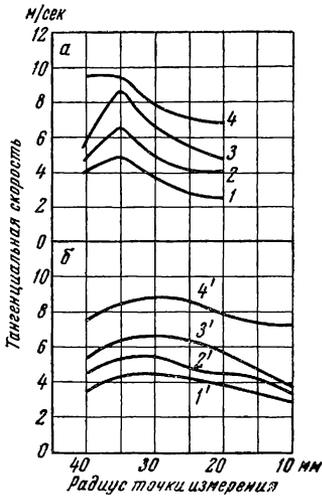


Рис. 24. Изменение тангенциальной скорости воды в цилиндрической (а) и конической (б) частях гидроциклона при различных давлениях на входе:

1, 1' — 0,5 ати; 2, 2' — 0,8 ати; 3, 3' — 1,2 ати; 4, 4' — 2,2 ати

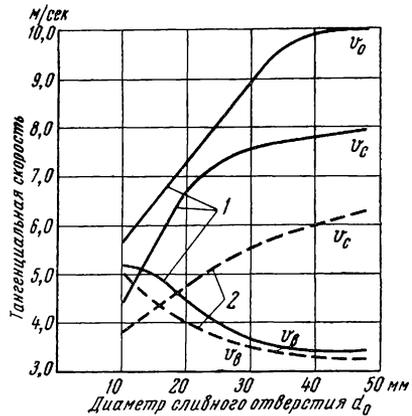


Рис. 25. Изменение тангенциальной скорости воды в гидроциклоне в зависимости от диаметра сливного отверстия d_0 :

1 — в цилиндрической части; 2 — в конической части; v_0 , v_C , v_B — соответственно скорости у стенки и у границ воздушного столба

различных давлениях питания в пределах от 0,5 до 2,2 ати как в цилиндрической, так и в конической частях. При данном соотношении размеров разгрузочных отверстий гидроциклона тангенциальная скорость как в цилиндрической части, так и в конической с уменьшением радиуса вращения уменьшается.

Влияние диаметра сливного отверстия на характер изменений тангенциальной скорости показано на рис. 25.

Кривые на рис. 25, построенные по данным табл. 2, показывают, что с уменьшением диаметра сливного отверстия тангенциальная скорость во внешнем потоке уменьшается, а во внутреннем, наоборот, возрастает. Характер изменения тангенциальной скорости вдоль радиуса вращения жидкости неодинаков на различных уровнях по высоте гидроциклона.

Таблица 2

Тангенциальные скорости воды в гидроциклоне при различных диаметрах сливного отверстия

Диаметр сливного отверстия, мм	Скорость ввода жидкости, м/сек	Тангенциальная скорость, м/сек	
		внешний поток	внутренний поток
<i>Цилиндрическая часть</i>			
40	10,0	8,0	3,3
35	9,7	7,2	3,4
25	7,5	7,4	4,1
15	6,4	5,7	5,1
10	5,7	4,4	5,2
<i>Коническая часть</i>			
35	9,7	5,8	3,3
25	7,5	5,2	4,0
15	6,4	4,4	4,4
10	5,7	3,8	5,2

Из данных этой же таблицы видно, что с увеличением диаметра сливного отверстия возрастает также скорость воды у входа в гидроциклон.

Изменение диаметра разгрузочной насадки оказывает несущественное влияние на характер изменения тангенциальной скорости, как это показано на рис. 26.

В табл. 3 приведены результаты измерения тангенциальной скорости при различном сочетании размеров сливного и разгрузочного отверстий. Эти данные подтверждают сделанный ранее вывод о влиянии диаметров отверстия разгрузочной насадки и сливного отверстия на изменение тангенциальной скорости (рис. 27).

Данные табл. 4 показывают, что угол конусности гидроциклона, при прочих равных условиях, мало влияет на характер изменения тангенциальной скорости жидкости в гидроциклоне (рис. 28, а, б).

Результаты определения величины тангенциальной скорости в отдельных точках в гидроциклоне при уменьшении площади отверстия питания приведены в табл. 5 и на рис. 28, б (правая часть диаграммы).

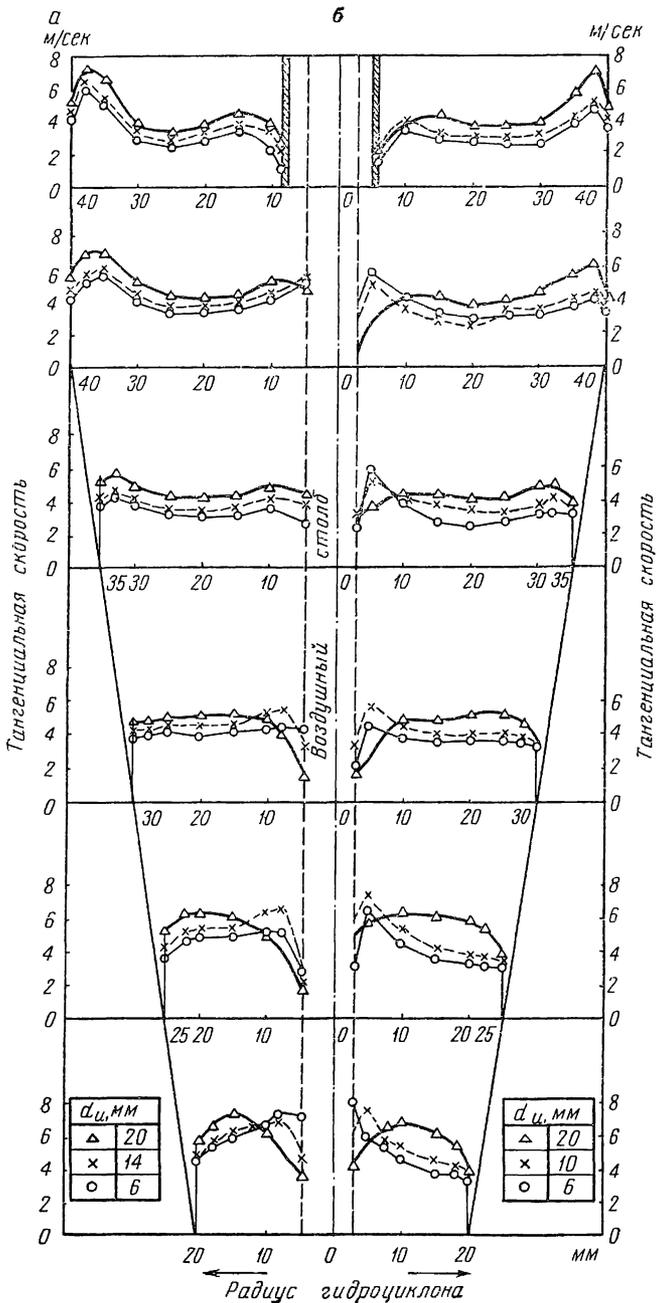


Рис. 26. Изменение тангенциальной скорости воды в гидроциклоне с углом конусности 20° при давлении $P = 1,2 \text{ атм}$ в зависимости от диаметра разгрузочного отверстия d_u при $d_0 = 15 \text{ мм}$ (а) и $d_0 = 10 \text{ мм}$ (б)

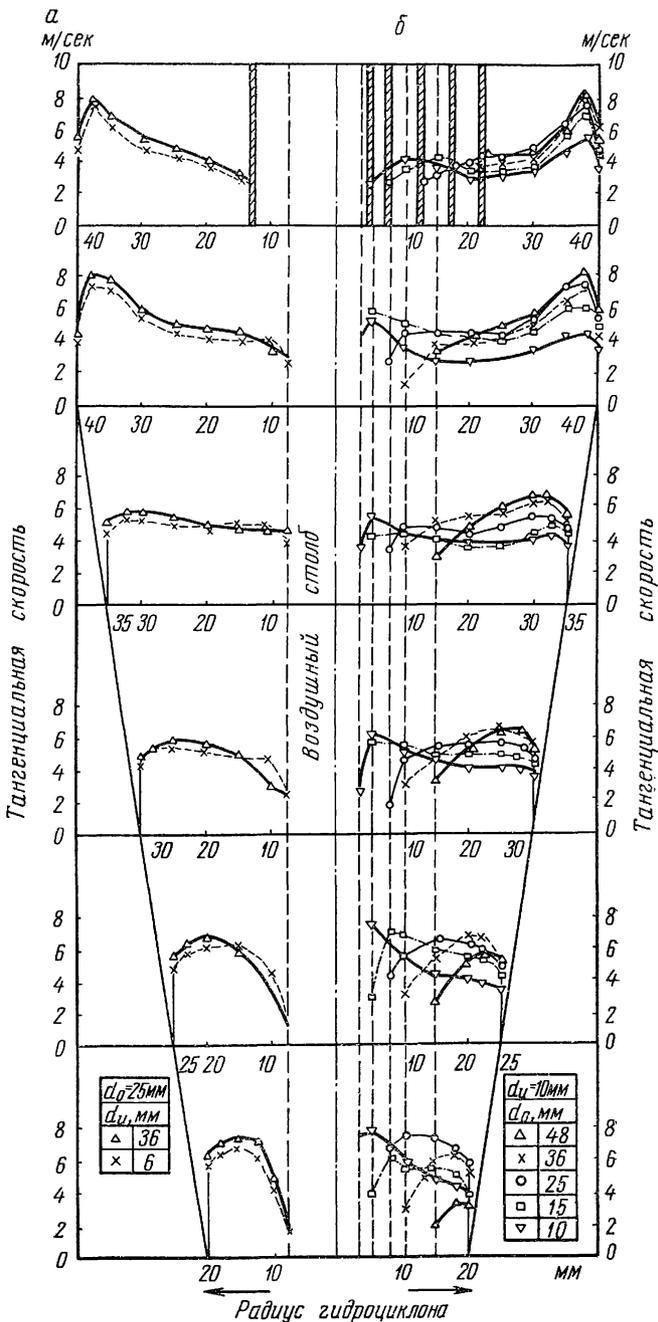


Рис. 27. Изменение тангенциальной скорости воды в гидроциклоне с углом конусности 20° при давлении 1,2 атм в зависимости от диаметров разгрузочного (а) и сливного (б) отверстий

Тангенциальная скорость воды в гидроциклоне при различных диаметрах разгрузочного и сливного отверстий (давление питания 1,2 атм), м/сек

Зона измерения	Радиус измерения, мм	Диаметр сливной трубки, мм				
		48	35	25	15	10
		диаметр насадки, мм				
		20	20	10	8	6

Цилиндрическая часть

1	40	4,7	5,2	4,9	4,4	3,6
	38	9,4	6,2	7,4	6,0	4,7
	35	8,6	8,4	6,2	5,3	3,8
	30	6,2	6,3	4,7	2,9	2,7
	26	4,4	—	—	—	—
	25	—	5,2	4,3	2,7	2,6
	20	—	4,2	3,9	2,9	2,7
	18	—	4,2	—	—	—
	15	—	—	3,2	3,3	2,9
	14	—	—	—	—	—
	10	—	—	2,7	2,2	3,7
	9	—	—	—	1,1	—
	5	—	—	—	—	1,5
2	40	4,4	5,2	3,9	4,4	3,2
	38	8,3	6,2	7,4	5,4	4,3
	35	8,0	8,1	7,1	5,7	3,7
	30	5,9	6,3	5,4	4,3	3,3
	25	5,4	5,2	4,6	3,8	3,2
	20	3,9	4,6	4,2	3,6	2,9
	15	3,2	3,6	4,3	3,8	3,1
	10	—	3,6	4,3	4,3	4,1
	8	—	—	2,7	5,4	5,9

Коническая часть

3	35	4,1	4,9	4,1	4,1	3,2
	32	7,0	6,1	5,2	4,3	3,2
	30	5,9	6,2	5,2	3,9	3,2
	25	4,1	6,1	4,6	3,4	2,7
	20	3,2	5,4	4,3	3,3	2,7
4	30	4,1	4,9	4,1	3,9	2,7
	28	6,5	6,1	5,2	4,1	3,2
	25	6,6	6,2	5,3	4,2	3,6
	20	5,4	6,1	5,2	4,0	3,7
	18	3,2	—	—	—	—
	15	Воздушный столб	4,4	4,9	4,3	3,7
10	—	3,2	4,6	4,3	4,2	
5	25	4,1	4,9	4,8	3,8	3,2
	22	5,7	6,1	5,9	4,6	3,3
	20	5,2	6,0	6,0	5,1	3,4
	18	3,2	—	—	—	—

Тангенциальная скорость воды в гидроциклоне при различных углах конусности
(давление питания 2,2 атм, площадь отверстия питания 0,785 см²,
диаметр разгрузочного отверстия 8 мм), м/сек

Зона измерения	Радиус измерения, мм	Угол конусности					
		20°		30°		45°	
		диаметр отверстия сливной трубки, мм					
		48	25	48	25	48	25

Цилиндрическая часть

1	40	13,1	10,8	9,8	10,2	12,3	10,8
	38	15,4	10,8	14,2	9,1	15,0	10,8
	35	13,0	9,6	12,1	8,0	12,3	7,9
	30	9,6	7,9	8,9	8,0	9,6	8,0
	25	8,5	7,3	8,5	7,9	9,4	8,4
	20	—	6,9	—	7,7	—	8,4
	15	—	5,9	—	6,5	—	7,2
2	40	9,4	7,9	13,5	8,8	10,5	9,8
	38	11,7	10,4	14,7	13,0	13,0	10,5
	35	13,2	10,2	12,7	10,5	11,4	9,4
	30	10,2	8,5	11,3	9,8	10,5	8,9
	25	8,9	8,2	10,9	9,8	9,4	8,9
	20	8,3	8,0	8,9	9,4	7,9	8,8
	15	8,0	8,3	6,5	9,2	6,4	8,8
	10	—	6,3	—	8,3	—	8,8
	8	—	4,5	—	7,9	—	6,5

Коническая часть

3	35	9,4	7,7	9,8	8,5	—	—
	32	10,4	8,4	11,2	8,8	10,4	9,6
	30	10,5	8,5	11,4	9,1	11,0	10,0
	25	10,5	8,4	11,0	8,8	11,4	9,7
	20	8,8	7,9	8,5	9,1	9,4	9,1
	15	3,5	8,3	4,5	9,1	6,4	8,0
	10	—	8,7	—	8,4	—	7,2
	8	—	8,5	—	5,4	—	5,2
4	30	9,4	8,0	9,8	8,5	—	—
	28	10,4	8,3	11,2	8,8	—	—
	25	10,0	9,1	11,2	9,1	6,2	9,6
	22	—	—	10,5	—	6,0	10,7
	20	6,5	8,8	7,7	8,8	2,2	11,4
	15	3,5	9,1	4,5	8,0	0	11,4
	10	—	9,4	—	5,2	—	9,1
	8	—	8,3	—	2,2	—	7,3
5	25	7,3	9,8	—	—	—	—
	22	10,4	9,8	5,9	9,4	—	—
	20	8,3	9,8	8,8	11,4	—	—
	18	—	—	5,9	—	—	—
	15	3,3	9,1	0	11,9	—	—

Зона измерения	Радиус измерения, мм	Угол конусности					
		20°		30°		45°	
		Диаметр отверстия сливной трубки, мм					
		48	25	48	25	48	25
5	10	—	8,3	—	11,9	—	—
	8	—	7,4	—	10,5	—	—
	15	—	5,4	6,0	4,9	3,7	—
	10	—	3,2	5,5	5,3	4,6	—
6	20	4,1	4,9	5,8	4,9	3,4	—
	18	4,1	6,1	6,4	5,4	3,8	—
	15	3,2	6,1	7,0	5,9	3,9	—
	12	—	—	7,4	6,1	4,3	—
	10	—	2,7	6,5	6,6	5,2	—

При уменьшении площади входного отверстия с 0,785 до 0,360 см² уменьшается абсолютная величина тангенциальной скорости, но не изменяется характер ее распределения вдоль радиуса. При уменьшении площади входного отверстия давление на входе жидкости в гидроциклон возрастает. Однако скорость на входе и количество жидкости, поступающей в гидроциклон, значительно уменьшаются.

Экспериментальные данные о характере изменения величины тангенциальной скорости в гидроциклоне вдоль радиуса на различных горизонтальных уровнях и о влиянии основных факторов на изменение этой скорости позволили сделать следующие выводы.

Утверждение Деметера о том, что жидкость в гидроциклоне вращается с постоянной тангенциальной скоростью, неверно.

Окружная скорость является переменной величиной и изменяется в зависимости от радиуса вращения, но не во всех случаях увеличивается с уменьшением радиуса, как утверждают многие исследователи.

Предложенная Дриссеном и признанная рядом исследователей зависимость $v^n = \text{const}$ справедлива и отражает общий характер изменения тангенциальной скорости реальной жидкости в гидроциклоне в зависимости от радиуса вращения. Однако показатель степени n в этой формуле не всегда имеет положительный знак.

Характер изменения тангенциальной скорости вдоль радиуса определяется конструктивными размерами разгрузочных отверстий гидроциклона, главным образом диаметрами сливного отверстия. Давление на входе, размер входного отверстия и угол конусности гидроциклона оказывают несущественное влияние на характер изменения тангенциальной скорости.

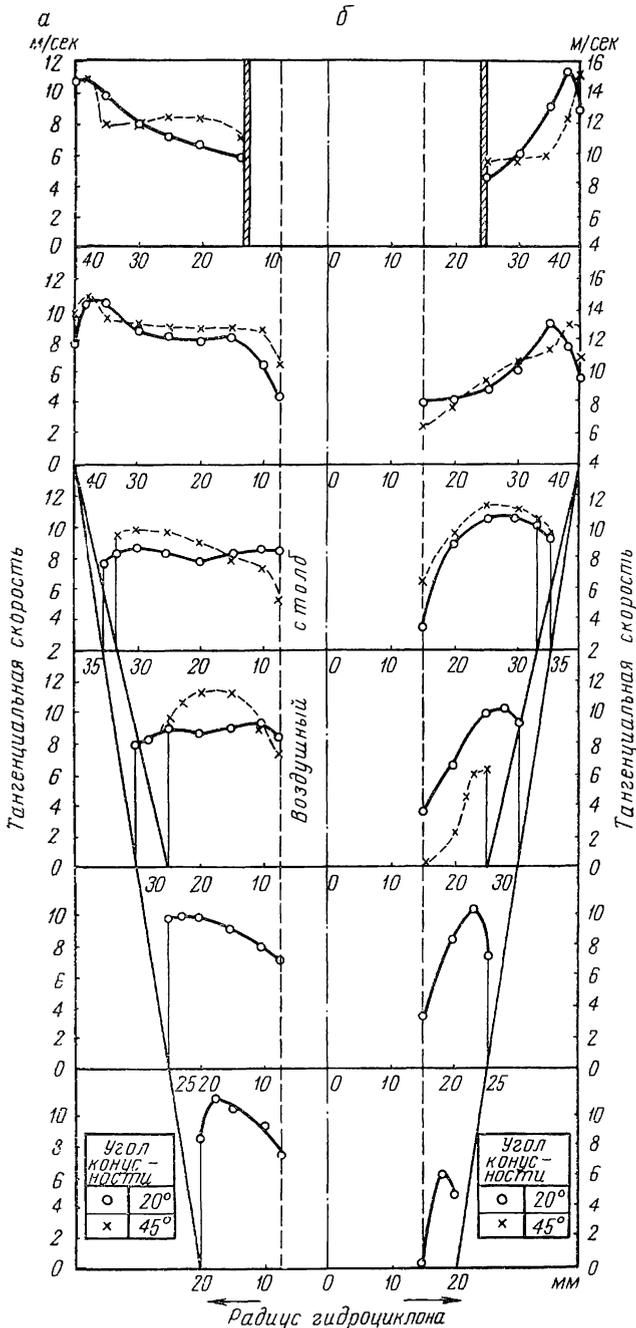


Рис. 28. Изменение тангенциальной скорости воды в гидроциклоне в зависимости от угла конусности при $d_0 = 25$ мм (а) и $d_0 = 48$ мм (б) и $d_{II} = 8$ мм

Таблица 5

Тангенциальная скорость воды в гидроциклоне при различных размерах питающего отверстия (диаметр сливного отверстия 48 мм, диаметр разгрузочного отверстия 8 мм, угол конусности 45°) м/сек

Зона измерения	Радиус измерения, см	Давление питания, атм	
		2,2	3,0
		Расход воды, см ³ /сек	
		1200	900
		Площадь отверстия питания, см ²	
0,785	0,360		

Цилиндрическая часть

1	40	12,3	10,0
	38	15,0	9,8
	35	12,3	9,4
	30	9,6	8,5
	25	9,4	7,9
2	40	10,5	6,7
	38	13,0	10,4
	35	11,4	8,9
	30	10,5	8,4
	25	9,4	7,1
	20	7,9	7,0
	15	6,4	4,6

Коническая часть

3	32	10,4	7,0
	30	11,0	8,3
	25	11,4	7,4
	20	9,4	4,9
	15	6,4	4,7
4	25	6,2	4,4
	22	6,0	4,9
	20	2,2	3,4
	15	—	—

При относительно малых диаметрах сливного отверстия по сравнению с диаметром отверстия разгрузочной насадки тангенциальная скорость, имея минимальное значение у стенки циклона, увеличивается с уменьшением радиуса, а при больших диаметрах сливного отверстия она уменьшается.

Зависимость тангенциальной скорости от радиуса вращения различна на разных горизонтальных уровнях гидроциклона.

ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

1. СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Характер перемещения зерен и результаты разделения минералов зависят от их физических свойств и от условий, в которых происходит перемещение. В основе разработки теории гравитационного метода обогащения лежат закономерности движения зерен в водной среде. Главной задачей в исследовании закономерностей движения зерен в среде является определение скорости движения отдельных минеральных зерен, отличающихся плотностью, крупностью, формой, характером поверхности и другими свойствами. В этом направлении проведено много теоретических и экспериментальных исследований и предложен ряд формул и уравнений для определения скорости падения.

Условия движения твердых частиц в гидроциклоне принципиально отличаются от условий падения.

Закономерности движения минеральных зерен в гидроциклоне изучены крайне слабо, а исследования в этом направлении находятся в зачаточном состоянии. Из отдельных случаев экспериментального измерения скорости движения твердых частиц в гидроциклоне следует отметить исследование Келсалла [38]. Представив скорость движения частиц, так же как и воды, в виде тангенциальной скорости, направленной перпендикулярно к радиусу вращения в горизонтальной плоскости, радиальной, направленной вдоль радиуса в этой же плоскости, и вертикальной, направленной вниз, перпендикулярно к направлению первых двух составляющих скорости, Келсалл измерял величину вертикальной скорости, определял угол наклона траектории движения частицы к горизонтальной плоскости при помощи фотографирования и высчитывал остальные две составляющие скорости. Однако эти опыты проводились не с целью исследования закономерности движения минеральных зерен в гидроциклоне, а для визуального наблюдения за скоростью движения жидкости; твердые частицы (алюминиевая стружка) подбирались так, чтобы их скорость по возможности не отличалась от скорости движения жидкости.

При наших исследованиях ставилась задача экспериментального определения скоростей движения твердых частиц различной плотности и крупности, а также времени пребывания этих зерен в гидроциклоне при различных режимах работы.

Разработанного метода для определения скорости перемещения минеральных зерен в гидроциклоне не имеется. Сложность гидродинамических условий в гидроциклоне весьма затрудняет применение того или другого способа, которыми определяют скорость движения твердых частиц в текучей среде или скорость их падения при отсадке.

Для выбора способа и разработки метода измерения скоростей движения минеральных зерен в гидроциклоне могут быть рассмотрены метод электрических датчиков, метод визуального наблюдения и фотографирования с применением микроскопа или стробоскопа [19], электрохимический метод, метод измерения скорости с помощью фотоэлементов и радиометрические методы.

Достаточную точность измерения скорости движения твердых частиц в сложных гидродинамических условиях и при наличии больших скоростей движения могут обеспечить последние три метода. Электрохимический метод, предложенный нами, применим для измерения скорости группы минеральных зерен и не пригоден для определения скорости движения единичных зерен [4]. Сущность этого метода заключается в следующем.

Платиновые электроды, введенные в гидроциклон, поляризуются кислородом, растворенным в воде. В условиях поляризации сила тока прямо пропорциональна концентрации растворенного кислорода. При определенном напряжении поляризации устанавливается предельный ток. Если после этого подавать в гидроциклон твердые частицы, то они, соприкасаясь с электродами, нарушают явление поляризации, в связи с чем получается скачок тока. Изменение силы тока можно записать на пленку осциллографа.

При применении двух пар платиновых электродов, расположенных на определенном расстоянии по высоте гидроциклона, можно записать на пленку осциллографа две кривые, характеризующие резкое изменение силы тока от соприкосновения твердых частиц при прохождении их через гидроциклон с электродами.

Определив время между импульсами тока и зная расстояние между электродами, подсчитывают вертикальную скорость движения твердых частиц в гидроциклоне.

Метод определения скорости с помощью фотоэлементов позволил измерить скорости движения небольшой группы зерен в прозрачной модели гидроциклона диаметром (в цилиндрической части) 80 мм с углом конусности 20° [4]. Схема измерения включает фотоэлемент, выпрямитель и усилитель постоянного напряжения (рис. 29).

Два фотоэлемента прикреплялись к конической части гидроциклона снаружи на двух металлических стержнях и могли свободно перемещаться по высоте. Направленный от источника луч света освещал фотосопротивления, на которые через сопротивления R_1

и R_2 подавалось постоянное напряжение. При пересечении твердыми частицами светового луча количество света, падающего на фотосопротивления, изменяется, соответственно с этим изменяется сопротивление цепи и возникает импульс напряжения. Для усиления импульса использовались усилители постоянного напряжения типа GV-842. Подача соответствующих импульсов на усилители осуществлялась через емкости. Запись сигналов производилась на восьмидесятишлейфовом осциллографе. На пленку осциллографа записывались две кривые изменения напряжения тока с импульсом на каждой кривой.

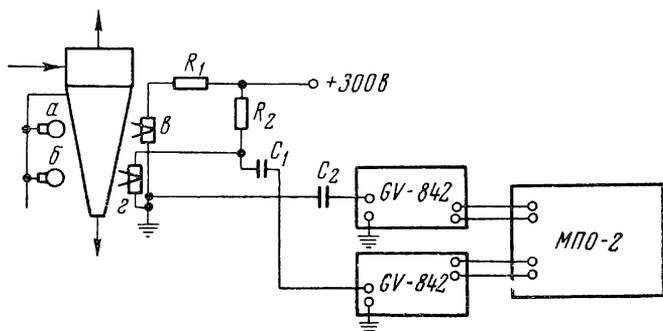


Рис. 29. Схема измерения скоростей движения твердых частиц в гидроциклоне с помощью фотозлемента:

$a, б$ — источники света; z, z' — фотозлемнты; R_1, R_2 — фотосопротивления; C_1, C_2 — емкости; GV-842 — усилитель; МПО-2 — осциллограф

Зная путь, пройденный частицами по вертикали, и время, определяли скорость их движения. Была измерена скорость движения частиц кварца крупностью: 2—3; 1,4—2; 1—1,4; 0,8—1; 0,5—0,8; 0,3—0,5 мм.

В гидроциклоне создавались такие условия, чтобы все зерна, скорость движения которых замерялась, отбрасывались на стенку конической части гидроциклона и двигались по ней к разгрузочной насадке. Частицы кварца подавались в гидроциклон через узкую трубу, нижний конец которой устанавливался непосредственно у всасывающего патрубка насоса. При каждом опыте подавались 5 г материала, который благодаря указанному выше способу загрузки одновременно поступал в гидроциклон и проходил по его стенке узкой полосой, наблюдаемой невооруженным глазом.

После измерения таким путем скорости вертикального перемещения частиц и угла, образованного траекторией движения их с вертикальной и горизонтальной осями гидроциклона, рассчитывалась тангенциальная скорость на данном радиусе. Угол между направлением движения группы твердых частиц и осью гидроциклона определялся при помощи фотографирования.

Результаты измерения приведены в табл. 6, а тангенциальные и вертикальные скорости движения твердых частиц различной крупности — на рис. 30.

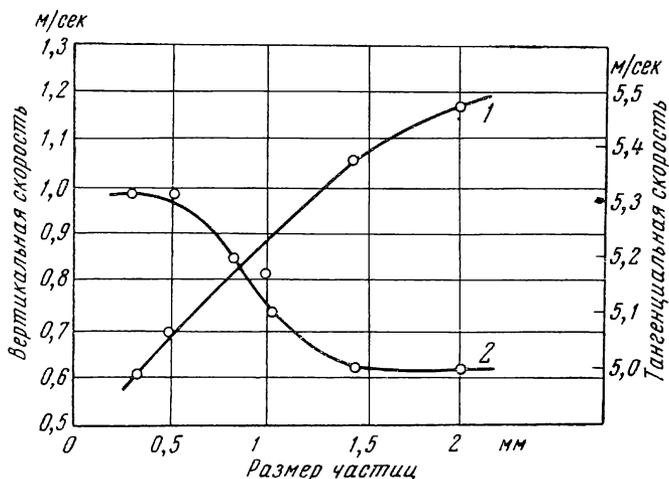


Рис. 30. Скорости движения твердых частиц различной крупности в гидроциклоне:

1 — вертикальная; 2 — тангенциальная

Таблица 6

Тангенциальные скорости движения воды и твердых частиц в гидроциклоне (давление на входе в гидроциклон 1 атм, угол конусности гидроциклона 20°, диаметр сливного отверстия 35 мм, диаметр насадки 10 мм, радиус замера 28 мм)

Класс, мм	Вертикальная скорость движения кварца, м/сек	Тангенциальная скорость движения, м/сек	
		кварца	воды
2—3	1,17	5,0	5,8
1,4—2	1,06	5,0	5,8
1—1,4	0,83	5,1	5,8
0,8—1	0,76	5,2	5,8
0,5—0,8	0,70	5,3	5,8
0,3—0,5	0,61	5,3	5,8

В последнее время для измерения скоростей движения твердых частиц применяется радиометрический метод [13, 17]. Однако в условиях гидроциклона вследствие наличия значительных скоростей движения и короткого времени пребывания частиц в аппарате применение этого метода затруднено.

В институте НИИУглеобогатение разработана методика измерения скоростей перемещения твердой частицы в гидроциклоне с помощью радиоактивных изотопов. При этом применяется стандартная аппаратура, выпускаемая нашими заводами [6, 7].

В качестве счетчиков, регистрирующих радиоактивное излучение, используются фотоэлектронные умножители, обладающие высокой чувствительностью и большой разрешающей способностью, установленные в выносном блоке ТИ радиометра ТИСС. При этом блок ТЗ используется в качестве источника питания ФЭУ высоким напряжением. В качестве датчика в блоке использован фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-19. С нагрузки фотоумножителя импульсы напряжения поступают на вход катодного повторителя на лампе 6Н15П. С выхода катодного повторителя импульсы напряжения подаются на дискриминирующее устройство, служащее для отсечки импульсов тока ФЭУ-19. В качестве дискриминатора использован германиевый диод типа Д2Е. Уровень запирающего напряжения регулируется с помощью переменного сопротивления. Импульсы напряжения с дискриминатора записываются на осциллографе МПО-2.

Метод регистрации перемещения меченой частицы основан на изменении интенсивности радиоактивного излучения при приближении к датчику и удалении от него. В качестве меченых частиц использовались шарообразные частицы из материала различной плотности со вставками радиоактивного изотопа Ag-110. Этим методом измерялись скорости движения частиц шарообразной формы плотности 1,3; 2,8 и 7,3 г/см³ на той же экспериментальной установке (см. рис. 17), только вместо фотоэлемента был установлен фотоэлектронный умножитель.

Исследовано влияние давления питания, диаметров сливной трубки и разгрузочной насадки на скорости движения минеральных частиц в водной среде.

Для определения тангенциальных скоростей движения создавались такие условия, при которых твердая частица вращалась на данном уровне в гидроциклоне. Счетчик, установленный на этом уровне, фиксировал время совершения частицей одного оборота. По известному радиусу вращения подсчитывалась тангенциальная скорость. Время прохождения частиц различной плотности от отверстия питания до разгрузочной насадки измерялось с помощью этого же счетчика. Результаты измерения скоростей приведены в табл. 7 и 8, графическое изображение — на рис. 31, 32 и 33.

Установлено, что тангенциальные скорости зерен различной плотности увеличиваются с повышением давления у входа в гидроциклон.

С увеличением диаметра сливного отверстия тангенциальные скорости увеличиваются в нижней зоне конической части; эти скорости более резко возрастают с увеличением диаметра сливного отверстия до 35 мм. Дальнейшее увеличение диаметра сливного отверстия вызывает снижение тангенциальной скорости.

Изменение отверстия разгрузочной насадки не оказывает существенного влияния на тангенциальные скорости минеральных зерен.

Было измерено время пребывания минеральных зерен в гидроциклоне при различных режимах его работы. При давлении питания

Т а б л и ц а 7

Тангенциальные скорости движения твердых частиц
при различных давлениях питания и диаметрах сливной трубки
(диаметр насадки 10 мм), м/сек

Плотность зерна, г/см ³	Диаметр сливной трубки, мм	Давление на входе в гидроциклон, ати			
		1	2	3	3,6
<i>Коническая часть (нижняя зона)</i>					
1,3	15	5,9	7,9	9,4	11,8
	25	7,8	12,5	15,7	21,0
	35	10,5	12,5	15,7	17,9
	40	10,1	11,8	14,1	15,7
<i>Коническая часть (верхняя зона)</i>					
2,8	15	7,3	8,3	10,6	11,7
	25	6,6	9,3	10,2	10,7
	35	7,8	9,7	10,7	11,3
	40	8,5	12,0	13,6	15,7
<i>Цилиндрическая часть</i>					
7,3	15	3,9	6,3	7,4	8,4
	25	4,2	7,0	7,9	9,0
	35	5,0	7,4	9,0	9,7
	40	5,7	7,9	9,3	10,5

Т а б л и ц а 8

Время прохождения твердых частиц через гидроциклон
при различных условиях (давление 1 ати,
диаметр насадки 10 мм), сек

Плотность частицы, г/см ³	Обороты твердой частицы в гидроциклоне	Диаметр сливной трубки, мм			
		10	15	25	35
1,3	1	0,064	0,054	0,042	0,032
	2	0,072	0,060	0,046	0,038
	3	0,070	0,060	0,043	0,038
	4	0,068	0,057	0,043	0,035
	5	0,056	0,050	0,036	0,030
	6	0,040	0,028	0,014	0,021
	7	—	—	—	0,012
Итого . . .		0,370	0,309	0,224	0,206
2,8	1	0,048	0,048	0,040	0,040
	2	0,057	0,055	0,049	0,048
	3	0,057	0,055	0,049	0,048
	4	0,057	0,048	0,049	0,044
	5	0,052	0,044	0,040	0,036
	6	0,028	0,020	0,016	0,016
Итого . . .		0,299	0,270	0,243	0,232

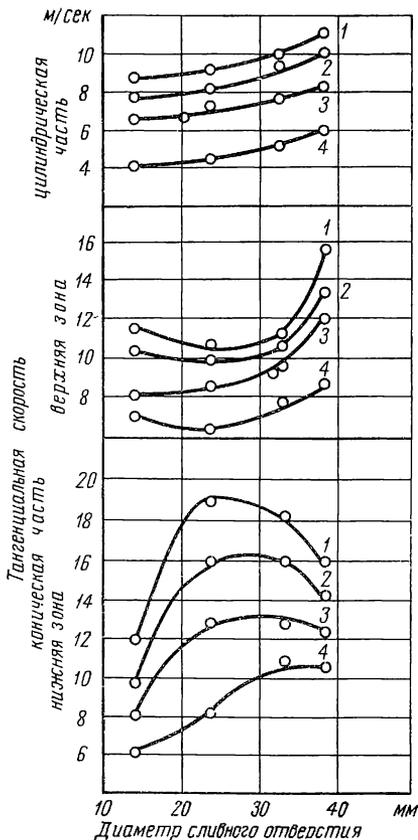


Рис. 31. Изменение тангенциальной скорости твердых частиц в зависимости от диаметра сливного отверстия при различных давлениях:

1 — 3,6 атм; 2 — 3 атм; 3 — 2 атм; 4 — 1 атм

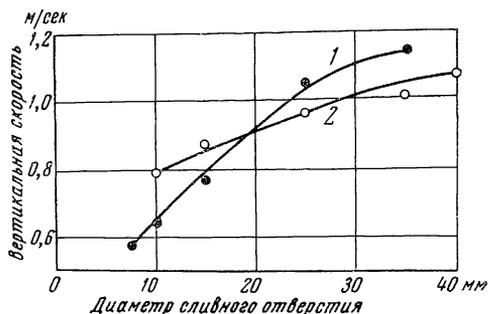


Рис. 32. Изменение вертикальной скорости твердых частиц в гидроциклоне в зависимости от диаметра сливной трубки:

1 — плотность твердых частиц 1,3 г/см³; 2 — плотность твердых частиц 2,8 г/см³

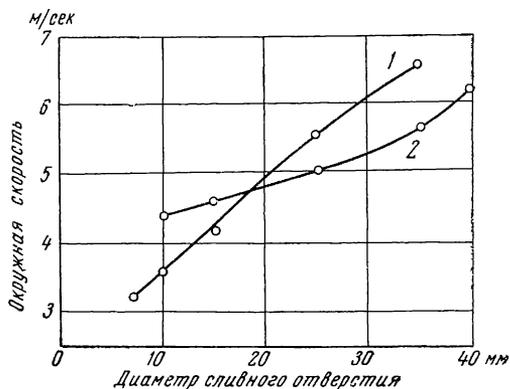


Рис. 33. Изменение тангенциальной скорости твердых частиц в гидроциклоне в зависимости от диаметра сливной трубки:

1 — плотность твердых частиц 1,3 г/см³; 2 — плотность твердых частиц 2,8 г/см³

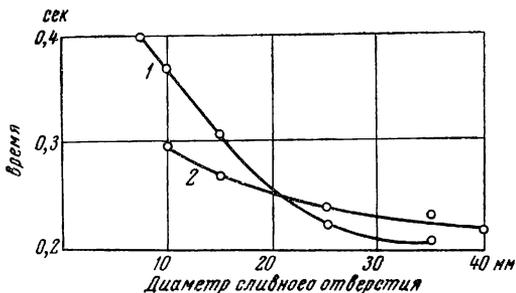


Рис. 34. Изменение времени перемещения твердых частиц по стенке гидроциклона в зависимости от диаметра сливной трубки:

1 — плотность твердых частиц 1,3 г/см³; 2 — плотность твердых частиц 2,8 г/см³

1 *ати* зерна находятся в гидроциклоне 0,2—0,4 *сек*, сделав при этом четыре оборота в цилиндрической части и два оборота в конической, они достигают разгрузочной насадки. В цилиндрической части зерно вращается в течение 0,174 *сек*, перемещаясь вниз на расстояние 8 *см*, а в конической — только лишь 0,05 *сек*, проходя за это время расстояние в осевом направлении 17 *см*. При этих условиях работы зерно совершает четыре оборота в центробежном насосе, которым жидкость подается в гидроциклон. Время пребывания зерен в гидроциклоне изменяется в зависимости от диаметра сливной трубки и давления питания (рис. 34), но не зависит от диаметра разгрузочной насадки. С увеличением диаметра сливной трубки от 10 до 35 *мм* время нахождения зерна уменьшилось в 1,8 раза. Вертикальная скорость движения зерна в цилиндрической части гидроциклона в 10—12 раз меньше тангенциальной, в то время как в конической части это соотношение резко изменяется. Здесь тангенциальная скорость только лишь в 2—2,5 раза больше вертикальной вследствие того, что возрастание вертикальной скорости по мере перемещения зерна вниз происходит значительно быстрее, чем тангенциальной. Схема движения твердых частиц в гидроциклоне показана на рис. 35.

На основании данных экспериментального исследования установлено следующее.

1. С увеличением размера твердых частиц возрастает вертикальная скорость их перемещения в гидроциклоне.

2. Тангенциальная скорость частиц в зависимости от крупности изменяется незначительно.

3. Зерна кварца и угля размером +0,3 *мм* имеют меньшую тангенциальную скорость движения, чем поток воды. Уменьшение тангенциальной скорости зерен размером 0,3—3 *мм* по сравнению со скоростью потока воды составляет 8—14%.

4. Зерна кварца размером +0,3 *мм* при давлении 1 *ати* под действием центробежной силы отбрасываются к стенке гидроциклона и движутся по ней к разгрузочной насадке. Время пребывания этих зерен в гидроциклоне составляет десятые доли секунды (для зерен диаметром 3 *мм* — 0,2 *сек*).

5. Время пребывания зерен в цилиндрической части гидроциклона в несколько раз больше, чем в конической.

6. Тангенциальная скорость зерен различной плотности возрастает с увеличением диаметра сливного отверстия, а также с повышением давления, вследствие чего усиливается действие

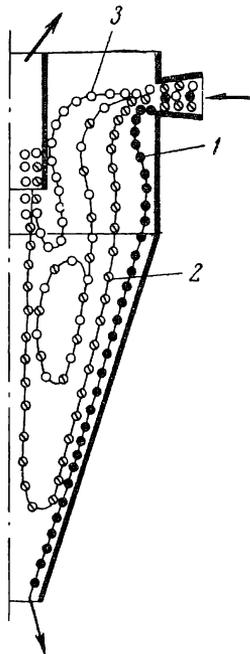


Рис. 35. Схема движения твердых частиц в гидроциклоне:

1 — порода; 2 — сорстки; 3 — уголь

центробежной силы и возрастает скорость перемещения зерен в направлении к разгрузочной насадке.

7. Изменение диаметра разгрузочной насадки не влияет на скорость перемещения минеральных зерен в гидроциклоне.

8. Характер изменения скорости движения в зависимости от диаметра сливной трубки неодинаков для зерен различной плотности. Зерна плотностью $2,8 \text{ г/см}^3$ имеют относительно большую окружную скорость при малых отверстиях сливной трубки, а зерна плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$, наоборот, — при больших отверстиях. Следовательно, можно подобрать такой диаметр сливного отверстия, при котором зерна различной плотности будут иметь одинаковые тангенциальные скорости. При этих условиях в гидроциклоне происходит классификация материала.

Исследовано движение твердых частиц в тяжелой среде в гидроциклоне. В качестве тяжелой среды использовался раствор хлористого кальция плотностью менее $1,3 \text{ г/см}^3$, поскольку ранее проведенными исследованиями было установлено, что при обогащении мелких классов угля в гидроциклонах могут быть использованы тяжелые суспензии, имеющие плотность меньше $1,3 \text{ г/см}^3$.

В процессе исследований измерялись время пребывания и скорость движения твердых частиц плотностью $1,22$ и $2,8 \text{ г/см}^3$ в различных зонах гидроциклона. В табл. 9 приводятся данные о времени пребывания твердых частиц крупностью 3 мм в цилиндрической части гидроциклона и в двух зонах конической части — в верхней и нижней.

Т а б л и ц а 9
Время пребывания твердых частиц крупностью 3 мм
в различных зонах гидроциклона

Плотность среды, г/см^3	Время пребывания твердых частиц, сек					
	в цилиндрической части	в конической части				
		в верхней зоне		в нижней зоне		
	Плотность твердых частиц, г/см^3					
	1,22	2,8	1,22	2,8	1,22	2,8
1,20	0,080	0,220	0,064	0,072	0,132	0,140
1,25	0,080	0,220	0,270	0,184	—	0,100
1,30	0,072	0,128	0,420	0,320	0,040	0,108

Установлено, что легкие частицы находятся в цилиндрической части гидроциклона менее продолжительное время, чем тяжелые. Этим подтверждается положение о том, что процесс разделения начинается в цилиндрической части гидроциклона, где происходит выделение основной массы легких угольных частиц. При движении в среде плотностью $1,22$ и $1,25 \text{ г/см}^3$ частицы плотностью $1,22 \text{ г/см}^3$ совершают в цилиндрической части лишь два оборота, после чего переходят в осевую зону гидроциклона и выносятся из аппарата,

а тяжелые частицы (плотностью $2,8 \text{ г/см}^3$) делают 5—6 витков и находятся здесь более продолжительное время.

Легкая частица попадает в нижнюю зону конической части гидроциклона лишь при плотности среды, не превышающей $1,2 \text{ г/см}^3$. Время пребывания тяжелых частиц в нижней зоне конической части гидроциклона при плотности среды $1,3 \text{ см}^3$ несколько уменьшается вследствие того, что здесь частица попадает в восходящий поток и выносится через верхнюю насадку.

Твердая частица плотностью $2,8 \text{ г/см}^3$ находится в гидроциклоне более продолжительное время, чем легкая (рис. 36). Время пребывания как легких, так и тяжелых частиц в гидроциклоне увеличивается с повышением плотности среды. Так, например, время пребывания твердых частиц в гидроциклоне при плотности среды $1,25 \text{ г/см}^3$ примерно в два раза больше, чем в водной среде (табл. 10).

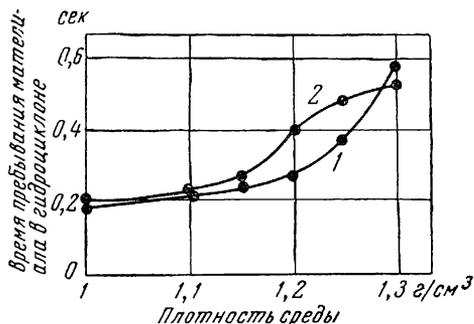


Рис. 36. Изменение времени пребывания твердых частиц в гидроциклоне в зависимости от плотности среды:

1 — плотность среды $1,22 \text{ г/см}^3$; 2 — плотность среды $2,8 \text{ г/см}^3$

Увеличение времени пребывания обогащаемого материала в гидроциклоне повышает эффективность процесса разделения частиц различной плотности. Однако при этом необходимо сокращать разницу во времени пребывания в аппарате легких и тяжелых частиц. Если процесс плохо отрегулирован и легкие частицы задерживаются в гидроциклоне более продолжительное время, чем тяжелые, то

Таблица 10

Время пребывания твердых частиц крупностью 3 мм в гидроциклоне и число совершаемых оборотов при различной плотности среды

Плотность среды, г/см^3	Плотность частиц, г/см^3				Примечание
	1,22		2,8		
	время пребывания, сек	число оборотов	время пребывания, сек	число оборотов	
1,00	0,202	6	0,220	7	Частица плотностью $1,22 \text{ г/см}^3$ уходит в слив при плотности среды больше $1,15 \text{ г/см}^3$
1,10	0,228	6	0,236	7	
1,15	0,272	7	0,284	—	
1,20	0,276	11	0,432	12	Частица плотностью $2,8 \text{ г/см}^3$ выносится в слив при плотности среды $1,3 \text{ г/см}^3$
1,25	0,351	13	0,504	16	
1,30	0,532	19	0,556	22	

будет происходить постепенное накапливание легких фракций, часть которых вследствие этого уйдет в тяжелый продукт. Более продолжительное время нахождения тяжелых зерен в аппарате повлечет за собой накапливание тяжелых фракций, что приведет к увеличению количества этих фракций в легком продукте. Процесс обогащения происходит более эффективно, если разделяемые зерна (тяжелые и легкие) имеют одинаковое время пребывания в гидроциклоне.

Как показано на рис. 37, с повышением плотности среды намного увеличивается число оборотов, совершаемых частицами в гидроциклоне. Однако разница в количестве витков тяжелой и легкой

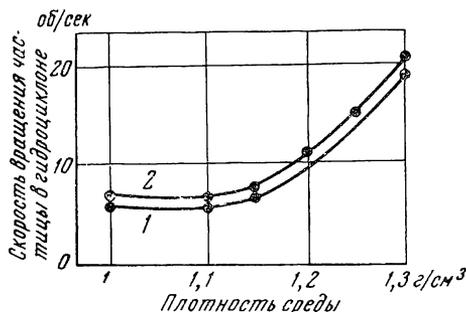


Рис. 37. Изменение числа оборотов твердых частиц в гидроциклоне в зависимости от плотности среды:

1 — плотность среды 1,22 г/см³; 2 — плотность среды 2,8 г/см³

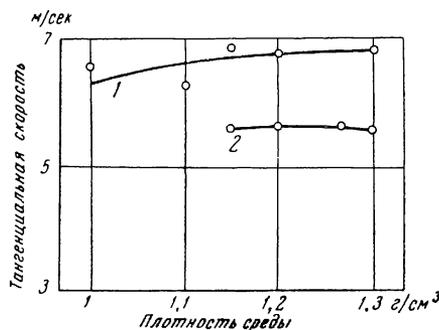


Рис. 38. Тангенциальные скорости твердых частиц во внешнем и внутреннем потоках при различной плотности среды в гидроциклоне:

1 — внешний поток; 2 — внутренний поток

Таблица 11

Тангенциальные скорости движения твердых частиц во внешнем и внутреннем потоках жидкости в гидроциклоне

Плотность среды, г/см ³	Тангенциальные скорости в потоках, м/сек:	
	внешнем	внутреннем
1,00	6,6	—
1,10	6,3	—
1,15	6,9	5,6
1,20	6,8	5,7
1,25	6,8	5,6
1,30	6,9	5,6

ней насадок тангенциальная скорость во внешнем потоке больше, чем во внутреннем. На рис. 38 показано, что с повышением плотности среды до 1,3 г/см³ тангенциальная скорость частиц как во внешнем, так и во внутреннем потоках изменяется незначительно.

На основании проведенного экспериментального исследования движения твердых частиц в гидроциклоне с тяжелой средой установлено следующее:

1) через сливное отверстие выносятся также твердые частицы, плотность которых превышает плотность среды;

2) время пребывания как легких, так и тяжелых твердых частиц в гидроциклоне и число оборотов, совершаемых ими, увеличиваются с повышением плотности среды;

3) на продолжительность пребывания твердых частиц в гидроциклоне существенное влияние оказывает соотношение диаметров сливного и разгрузочного отверстий. С уменьшением этого отношения увеличивается время пребывания частиц в аппарате.

2. АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Обычно при рассмотрении движения твердых частиц в центробежном поле исходят из максимально упрощенной схемы без каких-либо попыток оценить реальную совокупность факторов, обуславливающих реальное движение. По этой схеме учитывается лобовое сопротивление только в радиальном направлении, величина которого определяется в соответствии с линейным законом Стокса. Значительно реже такое сопротивление берут по квадратичному закону, но при этом пренебрегают лобовым сопротивлением в нерадиальных направлениях.

Известно, что совокупность центробежной силы и давления жидкости в основном определяет траекторию движения твердой частицы в гидроциклоне, поэтому представляется полезным дать хотя бы грубо приближенную качественную оценку реальных сил, действующих на твердые частицы в гидродинамическом центробежном поле.

Динамическое воздействие реального потока на находящуюся в нем твердую частицу имеет, очевидно, пространственный характер и зависит от геометрической разности вектора скорости частицы w и вектора скорости жидкости v в данном месте потока, т. е. от $w - v$. Если обозначить соответствующие компоненты скоростей индексами 1, 2, 3, а динамическую силу, приложенную со стороны потока на частицу, через S и ее компоненты — через S_1, S_2, S_3 , то в случае линейного воздействия

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= a_{11}(w_1 - v_1) + a_{12}(w_2 - v_2) + a_{13}(w_3 - v_3); \\ S_2 &= a_{21}(w_1 - v_1) + a_{22}(w_2 - v_2) + a_{23}(w_3 - v_3); \\ S_3 &= a_{31}(w_1 - v_1) + a_{32}(w_2 - v_2) + a_{33}(w_3 - v_3), \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где тензор a зависит от местной скорости v , от формы частицы и от вязкости жидкости.

С физической точки зрения силы, действующие на частицу в различных направлениях в гидроциклоне, могут быть сведены к

лобовому сопротивлению и к подъемным силам, возникающим за счет вихревого движения жидкости. Подъемные силы перпендикулярны вектору относительной скорости набегающего потока $w - v$ и вихрю $\Omega = \text{rot } v$.

Лобовое сопротивление характеризуется в формулах (20) диагональными членами. В случае сферической частицы коэффициенты a_{11} , a_{22} , a_{33} должны быть равны между собой. Обозначив их общее значение через k_1 и рассматривая силы, отнесенные к единице объема частицы, будем иметь

$$\bar{S}_{\text{лоб}} = -k_1 (\bar{w} - \bar{v}). \quad (21)$$

Для условий, когда применим закон Стокса,

$$k_1 = \frac{3\pi\mu d}{\pi d^3} = \frac{18\mu}{d^2},$$

где μ — динамическая вязкость;

d — диаметр частицы.

В общем случае k_1 включает в себя поправочный множитель к закону Стокса, который можно найти в соответствующем диапазоне чисел Рейнольдса, пользуясь, например, графиком Лященко.

Если отказаться от линейного закона и применять квадратичный закон сопротивления, принятый в аэродинамике, то, взяв для сферической частицы коэффициент сопротивления 0,25, получим

$$\bar{S}_{\text{лоб}} = \frac{0,25\rho \frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi d^3}{6}} (\bar{w} - \bar{v}, \bar{w} - \bar{v}) \frac{\bar{w} - \bar{v}}{(\bar{w} - \bar{v})}$$

или

$$\bar{S}_{\text{лоб}} = -0,375 \frac{\rho}{d} (\bar{w} - \bar{v}, \bar{w} - \bar{v}) \frac{\bar{w} - \bar{v}}{(\bar{w} - \bar{v})}, \quad (22)$$

где ρ — плотность жидкости.

Подъемные силы в формулах (20) представлены недиагональными слагаемыми. Для учета этих сил воспользуемся теоремой Жуковского о подъемной силе при циркуляционном обтекании кругового цилиндра в плоском потоке (где сила рассчитана на единицу длины цилиндра):

$$\bar{S}_{\text{под}} = \rho \bar{v}_{\infty} \times \tau \Gamma, \quad (23)$$

где \bar{v}_{∞} — скорость набегающего потока;

τ — орт направления вихря;

Γ — циркуляция скорости.

Величина циркуляции скорости при обтекании какого-либо контура, как известно, равна потоку вихря через поверхность, огражденную этим контуром. Поэтому можно принять

$$\tau \Gamma = \text{rot } \bar{v} \frac{\pi d^2}{4},$$

где d — диаметр цилиндра.

Вектор скорости набегающего потока берем в виде $\bar{v} - \bar{w}$. Пересчитывая (23) на единицу объема и вводя для случая сферической частицы поправочный коэффициент k_2 , получим

$$\bar{S}_{\text{под}} = k_2 \rho (\bar{v} - \bar{w}) \times \text{rot } \bar{v} = -k_2 \rho (\bar{w} - \bar{v}) \times \text{rot } \bar{v}, \quad (24)$$

где k_2 может быть найден экспериментально (значение его меньше единицы).

При разложении уравнения (24) на составляющие мы соответственно получили бы все педигональные слагаемые в формулах (20).

Твердая частица движется в жидкости не равномерно, а с некоторым ускорением. Это вызывает дополнительное возмущение жидкости, ее кинетическая энергия соответственно изменяется во времени и благодаря этому твердая частица испытывает дополнительное сопротивление. В случае прямолинейного движения твердого тела в покоящейся идеальной жидкости такое сопротивление учитывается методом присоединенных масс, т. е. сила инерции движущейся частицы умножается на коэффициент, зависящий от формы частицы.

Для сферической частицы указанный множитель равен $\frac{3}{2}$. Однако применительно к случаю криволинейного движения частицы в вязкой жидкости, имеющей весьма значительную собственную кинетическую энергию, приращением кинетической энергии жидкости из-за ускоренного движения частицы следует пренебречь и нет смысла вводить соответствующую поправку. Строго говоря, ускоренное движение может только отразиться на коэффициенте k_1 , т. е. привести к некоторой поправке в законе Стокса.

Перечисляя силы, действующие на частицу, следует учесть также действие статического давления. Эта сила не связана с движением частицы, а только с ее положением. Различные давления на поверхности частицы приводят к результирующей, которую для достаточно малой частицы произвольной формы можно отнести к единице объема и записать в виде

$$S_{\text{давл}} = -\text{grad } p. \quad (25)$$

В результате получим в векторном виде следующее дифференциальное уравнение движения частицы:

$$\rho_1 \frac{d\bar{w}}{dt} = k_1 (\bar{w} - \bar{v}) + k_2 \rho (\bar{v} - \bar{w}) \times \text{rot } \bar{v} - \text{grad } p, \quad (26)$$

где ρ_1, ρ — плотности частицы и жидкой среды;
 k_1, k_2 — коэффициенты;
 w — скорость частицы;
 \bar{v} — скорость жидкости;
 p — давление.

Сделаем анализ дифференциальных уравнений движения частицы. В цилиндрической системе координат r, z, φ скорость и ускорение частицы w и a имеют следующие проекции:

$$\begin{aligned} w_r &= \dot{r}; & w_z &= \dot{z}; & w_\varphi &= r\dot{\varphi}; \\ a_r &= \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2; & a_z &= \ddot{z}; & a_\varphi &= r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi}. \end{aligned} \quad (27)$$

Проекция вихря $\bar{\Omega} = \text{rot } \bar{v}$ представлены формулами:

$$\begin{aligned} \Omega_r &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (rv_\varphi)}{\partial z}; \\ \Omega_z &= -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (rv_\varphi)}{\partial r}; \\ \Omega_\varphi &= \frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial z}. \end{aligned} \quad (28)$$

Учитывая это, получим в цилиндрической системе вместо (26) следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \rho_1 (\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2) &= k_1 (v_r - \dot{r}) + k_2 \rho \left[(v_z - \dot{z}) \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + (v_\varphi - r\dot{\varphi}) \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (rv_\varphi)}{\partial r} \right] \\ \rho_1 \ddot{z} &= k_1 (v_z - \dot{z}) + k_2 \rho \left[(v_\varphi - r\dot{\varphi}) \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (rv_\varphi)}{\partial z} - \right. \\ &\quad \left. - (v_r - \dot{r}) \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial z}; \\ \rho_1 (r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi}) &= k_1 (v_\varphi - r\dot{\varphi}) + k_2 \rho \left[- (v_r - \dot{r}) \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (rv_\varphi)}{\partial r} - \right. \\ &\quad \left. - (v_z - \dot{z}) \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (rv_\varphi)}{\partial z} \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

В этих уравнениях следует считать v_r, v_z, v_φ известными, а координаты r, z, φ движущейся частицы — искомыми функциями.

Рассматривая уравнения (29), можно более четко сформулировать и оценить гипотезы, которыми обычно пользуются для получения расчетных схем движения частиц в центробежном потоке.

Действительно, допустим, что справедливы следующие три упрощающих предположения:

1) частица движется равномерно, т. е.

$$\ddot{r} = \ddot{z} = r\ddot{\varphi} = 0; \quad (30)$$

2) относительное движение частицы в жидком потоке можно учитывать только в радиальном направлении; в аксиальном и окружном направлениях таким движением можно пренебречь, т. е.

$$v_r - \dot{r} \neq 0; \quad v_z - \dot{z} \approx 0; \quad v_\varphi - r\dot{\varphi} \approx 0; \quad (31)$$

3) градиент давления в радиальном направлении определяется целиком из условий равновесия идеальной жидкости, вращающейся с местной угловой скоростью $w = \frac{v_\varphi}{r}$. Иначе говоря,

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho r \omega^2 = \rho \frac{v_\varphi^2}{r}. \quad (32)$$

При этих условиях $r\dot{\varphi} = v_\varphi = r\omega$, $\dot{\varphi} = \omega$, и первое из уравнений (29) примет вид

$$-\rho_1 r \omega^2 = k_1 (v_r - \dot{r}) - \rho r \omega^2,$$

что приведет к обычному широко применяемому равенству между стоксовой силой сопротивления и равнодействующей центробежной силы и сил давления:

$$k_1 (\dot{r} - v_r) = (\rho_1 - \rho) r \omega^2 = (\rho_1 - \rho) \frac{v_\varphi^2}{r}. \quad (33)$$

Обычно этим равенством ограничиваются, однако согласно (29) к нему можно добавить еще два:

$$\begin{aligned} k_2 \rho (v_r - \dot{r}) \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} &= 0; \\ 2\rho_1 \dot{r} \omega &= -k_2 \rho (v_r - \dot{r}) \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_\varphi)}{\partial r}. \end{aligned} \quad (34)$$

Здесь v_r , v_φ , v_z считаем заданными, а \dot{r} определяется из уравнения (33). Поэтому уравнение (34) представляет собой систему для определения градиента давления в аксиальном направлении $\frac{\partial p}{\partial z}$ и коэффициента подъемной силы k_2 . Конечно, при этом k_2 не получится в виде постоянной, но с некоторым приближением можно было бы в качестве k_2 принять среднее значение, получаемое из (34). С другой стороны, поскольку ни $\frac{\partial p}{\partial z}$, ни k_2 непосредственно к изучаемому вопросу не относятся, закономерно ограничиться формулой (33).

Следовательно, общепринятая схема изучения движения твердых частиц в центробежном поле не приводит к непосредственным противоречиям, если только справедливы сделанные нами допущения 1—3.

Экспериментальные данные по исследованию движения твердой частицы в гидроциклоне дают некоторое представление о движении

жидкости и твердых частиц в гидроциклоне. Исследование проводилось в гидроциклоне с непрерывной подачей воды, в потоке которой находился шарик с помещенными внутри его радиоактивными изотопами. В первой серии опытом варьировались плотность, размер шарика и диаметр сливной трубки. При этом фиксировался переменный период вращения шарика по стенке циклона и создавались такие условия, при которых шарик не выходил из гидроциклона, а, достигнув определенного уровня, оставался на этом уровне, вращаясь с постоянным периодом.

Для изучения предельного состояния шарика проводились отдельные опыты с большим диапазоном изменения варьируемых величин.

На основании опытных данных сделана попытка установить математическую зависимость радиуса вращения частицы от времени, т. е. установить координаты твердой частицы в зависимости от времени ее движения.

Опытные данные выражают зависимость угла поворота частицы от времени $\varphi_1 = \varphi(t)$, а следует найти зависимость $r_1 = r(t)$.

С этой целью воспользуемся основной формулой для тангенциальной скорости жидкости

$$v_{\varphi z} = \Phi(\psi). \quad (35)$$

согласно которой произведение тангенциальной скорости на радиусе вращения сохраняет постоянное значение вдоль каждой линии тока.

Для струйки, протекающей в достаточной близости стенок циклона и представляющей собой линию тока, $v_{\varphi r} = C$.

Если полагать, что твердая частица и жидкость имеют одинаковую угловую скорость (что является вполне допустимым, так как экспериментально установлено, что разница в этих скоростях незначительна), то получим закон изменения угловой скорости твердой частицы:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{C}{r^2}, \quad (36)$$

где C — постоянная, значение которой определяется опытным путем и справедливо во все время движения твердой частицы вблизи стенок циклона.

Из формулы (36) легко найти переменные значения для шарика

$$r = \sqrt{\frac{C}{\frac{d\varphi}{dt}}} \quad (37)$$

или

$$\frac{r}{r_0} = \sqrt{\frac{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_0}{\frac{d\varphi}{dt}}} \approx \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}\right)_0}{\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}}},$$

где индекс 0 соответствует данным, полученным для цилиндрической части циклона. Поскольку во всех случаях $\Delta\phi = 2\pi$, получим

$$\frac{r}{r_0} = \sqrt{\frac{\Delta t}{(\Delta t)_0}}, \quad (38)$$

где r — радиус рассматриваемой точки;

r_0 — радиус цилиндрической части циклона;

$(\Delta t)_0$ — период вращения в цилиндрической части;

Δt — значения переменных периодов.

Твердая частица находится в относительном равновесии у стенки циклона под действием ряда сил, из которых главными естественно полагать центробежную силу, силу лобового сопротивления набегающей жидкости и нормальную реакцию стенки. Если принять, что в окружном направлении твердая частица не отстает от движения жидкости, то нужно пренебречь силой трения о стенку, которая направлена в сторону, противоположную относительной скорости, а следовательно, в общем случае должна быть принята равной нулю одновременно и в окружном направлении, и вдоль образующей циклона.

Предполагая, что нет отставания твердой частицы в окружном направлении, следует также отказаться от учета дополнительных сил вдоль образующей, которые могли бы появиться как следствие неравномерного обтекания в указанном окружном направлении.

Силу лобового сопротивления определим по формуле

$$S_{\text{лоб}} = 0,25\rho \frac{\pi d^2}{4} u^2. \quad (39)$$

Центробежная сила

$$C = \rho_1 \frac{\pi d^3}{6} \cdot \frac{v_\phi^2}{r}. \quad (40)$$

Сравнивая проекцию сил вдоль образующей $S_{\text{лоб}} = C \sin \alpha$, получим

$$r = \frac{8}{3} \frac{\rho_1}{\rho} d \frac{v_\phi^2}{u^2} \cdot \sin \alpha. \quad (41)$$

Если, кроме v_ϕ , известно еще u , то для каждой твердой частицы с эффективной относительной плотностью ρ_0/ρ и диаметром d легко найти радиус r , при котором следует ожидать равновесного состояния.

Однако из опытных данных получены значения r , но не получены значения u . Примечательно, что значения r оказываются одинаковыми для различных потоков, получаемых при различных давлениях на входе и диаметрах сливного отверстия, т. е. при разных тангенциальных скоростях. Следовательно, можно судить о подобии (у стенки) потоков, полученных за счет варьирования сливного отверстия или давления на входе, т. е. утверждать, что для таких

потоков отношение тангенциальной и радиальной скоростей зависит только от l .

В выводе (41) предполагается совпадение тангенциальных скоростей жидкости и шариков. Такое допущение можно частично проверить, если сравнить в одинаковых потоках на разных радиусах произведение тангенциальной скорости шарика на радиус его вращения. Если тангенциальные скорости движения шариков и жидкости не отличаются между собой, то это произведение должно оставаться постоянным в одном и том же потоке и с той степенью точности, с какой поток вблизи стенки можно считать вихревым потоком идеальной жидкости.

Проведенные ориентировочные расчеты показывают, что можно пренебрегать отставанием шариков от жидкости при движении в окружном направлении и пользоваться вблизи стенок моделью вихревого идеального потока. С той же степенью точности можно полагать, что рассмотренные потоки при различных d_0 и p кинематически подобны.

Из уравнений (31) и (33) имеем

$$\dot{r} = v_r + \frac{\Delta\rho}{k_1} \frac{v_\Phi^2}{r}, \quad (42)$$

где $\Delta\rho = \rho_1 - \rho$;

$$\dot{z} = v_z; \quad r\dot{\Phi} = v_\Phi \quad (43)$$

и соответственно уравнение траектории движения твердой частицы определится из соотношений:

$$\frac{dr}{v_r + \frac{\Delta\rho}{k_1} \frac{v_\Phi^2}{r}} = \frac{dz}{v_z} = \frac{r d\Phi}{v_\Phi}. \quad (44)$$

Практически в симметричном относительно оси потоке вполне достаточно следить за движением частицы в меридиональной плоскости, т. е. за координатами r , z . Выделяя из уравнения (44) первое равенство, получим

$$\frac{dr}{dz} = \frac{v_r}{v_z} + \frac{\Delta\rho}{k_1} \frac{v_\Phi^2}{rv_z}. \quad (45)$$

Интегрируя это уравнение, получим искомую зависимость $r = r(z)$. Если в уравнение (45) подставить v_r , v_z , v_Φ , получим довольно сложные выражения, которые мало наглядны и не интегрируемы.

Однако оказывается, что уравнение (45) можно преобразовать и сделать пригодным в самом общем случае для вихревого потока идеальной жидкости, симметричного относительно оси.

Функция тока жидкости $\psi = \psi(r, z)$ определяет скорости жидкости:

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial z}; \quad v_z = \frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial r}; \quad v_\Phi = \frac{1}{r} \Phi(\omega). \quad (46)$$

На каждой из поверхностей тока $\psi(r, z) = \text{const}$. Следовательно, координаты частицы жидкости, перемещающейся вдоль линии тока, меняются так, что значение функции $\psi(r, z)$ не изменяется. Для твердой же частицы, которая движется по некоторой траектории, $r = r(z)$. Для этой частицы $\psi = \psi[r(z), z]$ и является функцией z .

Вычисляя полную производную этой функции, получим с помощью (46):

$$\frac{d\psi}{dz} = \frac{\partial\psi}{\partial r} \frac{dr}{dz} + \frac{\partial\psi}{\partial z} = -rv_r \frac{dr}{dz} + rv_r, \quad (47)$$

где v_r, v_z — скорости движения жидкости, а $\frac{dr}{dz}$ вычисляется для твердой частицы. Отсюда

$$\frac{dr}{dz} = -\frac{1}{rv_r} \frac{d\psi}{dz} + \frac{v_r}{v_z}. \quad (48)$$

Из уравнений (48) и (45) получим

$$-\frac{1}{rv_r} \frac{d\psi}{dz} + \frac{v_r}{v_z} = \frac{v_r}{v_z} + \frac{\Delta\rho}{k} \frac{v_\varphi^2}{rv_z} \quad (49)$$

или

$$\frac{d\psi}{dz} = \frac{\Delta\rho}{kv_\varphi^2}.$$

Функция $\Phi(\psi)$, определяющая v_φ (как указывалось в простейшем случае), представляется в виде

$$\Phi(\psi) = \sqrt{2a_0\psi + C}. \quad (50)$$

Следовательно, вместо уравнения (49) получим

$$\frac{d\psi}{dz} = \frac{\Delta\rho}{k} \frac{2a_0\psi + C}{r^2} \quad (51)$$

или

$$\frac{d\psi}{2a_0\psi + C} = \frac{\Delta\rho}{k} \frac{dz}{r^2}, \quad (52)$$

что равноценно уравнению (45).

Дифференциальное уравнение (52) определяет зависимость между ψ, r, z осаждаемой частицы, т. е. ее траекторию.

Проведенное экспериментальное исследование движения твердой частицы и анализ условий ее движения показали, что при соответствующих параметрах частица, попавшая во внутренний восходящий поток, будет вынесена им в слив.

Если же частица попадает на коническую стенку циклона, то возможны варианты ее движения, требующие дополнительного исследования. В зависимости от соотношения сил, действующих на частицу у стенки, она может, попав на стенку, двигаться вниз к разгрузочному отверстию, вверх и, наконец, находиться в равновесном состоянии.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ЗЕРЕН В ГИДРОЦИКЛОНЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Характер распределения минеральных зерен в гидроциклоне при работе его в качестве классификатора упрощенно представлен на рис. 39.

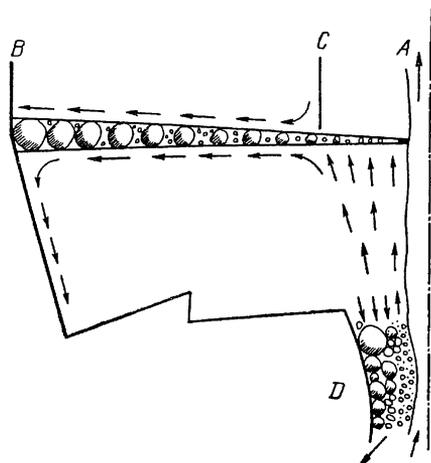


Рис. 39. Распределение зерен по крупности в гидроциклоне:

А — воздушный столб; В — стенка гидроциклона; С — сливная трубка; D — разгрузочная насадна

В области соединения цилиндрической и конической частей минеральные зерна разделяются по крупности в соответствии с величиной центробежной силы, действующей на эти зерна (т. е. наиболее крупные из них перемещаются к стенке гидроциклона).

Крупность зерен постепенно уменьшается в направлении к оси гидроциклона. Мелкие неклассификационные минеральные зерна, которые вследствие вихревого движения находятся во взвешенном состоянии, удаляются через сливное отверстие.

В нижней зоне конуса гидроциклона подобной резкой классификации не наблюдается.

Здесь, как указано на диаграмме, под действием вихревого потока жидкости часть мелких минеральных зерен поднимается вверх.

При увеличении сливного отверстия в слив выделяются более грубые зерна, а при уменьшении этого отверстия — более тонкие.

Широкое применение гидроциклонов для обогащения углей в тяжелых суспензиях вызвало необходимость более детального изучения закономерностей разделения минеральных зерен в них.

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ЗЕРЕН

Изучение закономерностей распределения минеральных зерен по крупности и плотности проводилось на прозрачной модели гидроциклона ИГД-80 (с диаметром цилиндрической части 80 мм и углом конусности 45°). Угол наклона оси гидроциклона к горизонтали около 7° . Давление на входе в гидроциклон в опытах составляло 2,2 и 3,0 *ати*.

Общая схема установки гидроциклона для исследования распределения зерен в процессе обогащения угля представлена на рис. 40.

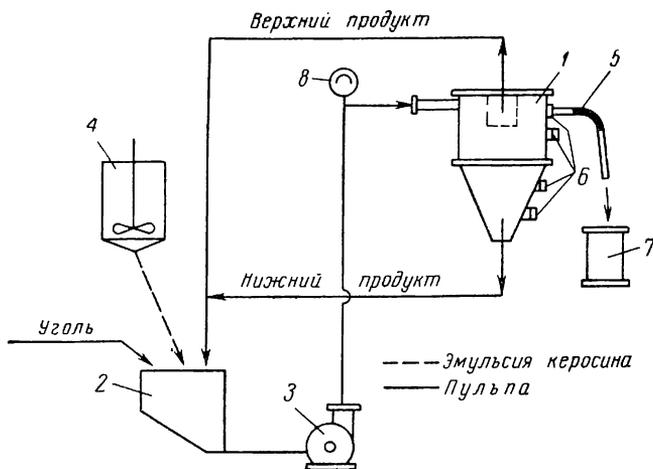


Рис. 40. Схема установки гидроциклона для изучения распределения зерен по плотности и крупности при обогащении угля:

- 1 — гидроциклон ИГД-80; 2 — зумпф насоса; 3 — песковый насос;
4 — контактный чан; 5 — стеклянная и резиновая трубки; 6 —
отверстия для отбора проб; 7 — сборник; 8 — манометр

При испытаниях была принята замкнутая схема работы гидроциклона с возвратом обоих продуктов (верхнего и нижнего) в зумпф питающего насоса.

Отбор проб осуществлялся с помощью стеклянной трубки, изготовленной по типу гидрометрической трубки Пито. Трубка вводилась в движущийся поток пульпы через отверстия, имеющиеся на разных уровнях в боковой стенке цилиндрической и конической частей гидроциклона. Открытым концом трубка устанавливалась навстречу движущемуся потоку пульпы таким образом, чтобы вектор тангенциальной составляющей скорости потока был направлен по оси отверстия.

При исследовании угля крупностью 0—1 и 0—3 мм отбор проб производился с помощью трубок с внутренним диаметром 4 мм и внешним 6 мм. Однако при исследовании угля крупностью 0—3 мм для отбора проб у стенки гидроциклона, где концентрируются более

крупные зерна, использовалась трубка большего диаметра (6,5 мм). Весь цикл отбора проб на одном горизонтальном уровне не превышал одной минуты, после чего зумпф освобождался, промывался, стеклянная трубка переносилась в следующее отверстие, и цикл повторялся снова. Продукты обогащения и отобранные в разных точках пробы рассеивались на классы (2—3; 1—2; 0,5—1; 0,25—0,5; 0,15—0,25; 0,1—0,15; 0,074—0,1; и 0,074 мм), после чего определялись выход и зольность каждого из них.

На основании проведенных исследований были выбраны оптимальные условия для изучения распределения зерен при обогащении угля крупностью 0,5—2 мм в магнетитовой суспензии крупностью 0,1 мм; диаметр гидроциклона 80 мм; угол конусности гидроциклона 20°; диаметр сливного отверстия 35 мм; длина сливной трубки 35 мм; диаметр насадки 13 мм для наклонного гидроциклона и 10 мм для вертикального; давление питания 2,8 атм; плотность суспензии 1,25 г/см³. Для изучения распределения зерен по плотности и крупности отбирались пробы из различных точек внутри гидроциклона через отверстия в боковой стенке.

При испытаниях отверстие трубки для отбора проб оставалось открытым (чтобы не забивалась трубка). Пульпа, вытекающая из трубки, снова поступала в зумпф в циркуляцию. Циркуляция материала при отборе проб позволяла поддерживать постоянные условия опытов (потери утяжелителя происходили лишь за счет отобранной пробы). Проба, отобранная из различных точек каждого горизонтального уровня, подвергалась обработке. Сначала проба взвешивалась, затем производилась отмывка угля от утяжелителя на сите с отверстиями 0,5 мм. После сушки магнетит и уголь взвешивались, уголь подвергался рассеиванию на классы с определением выхода и содержания золы в каждом классе. Опыты показали, что вследствие измельчения пробы угля на протяжении одной минуты выход класса 1—2 мм уменьшается на 15—20%, а класса 0,5—1 мм, наоборот, увеличивается на 10—13%. Количество образовавшейся мелочи — 0,5 мм составляет 10% от исходной пробы. Мелочь почти полностью уходит вместе с магнетитом при отсеивании на сите с отверстиями 0,5 мм. Учитывая это, при определении выхода (в процессе распределения

Таблица 12
Результаты ситового анализа исследуемого угля

Классы, мм	Выход, %		Зольность, %
	от операции	суммарный	
1—3	37,9	37,9	24,38
0,25—1	39,0	76,9	21,40
0—0,25	23,1	100,0	21,42
Итого . . .	100,0	—	22,52

зерен (по крупности) были сделаны соответствующие поправки на класс — 0,5 мм. Практически можно считать, что в данном случае

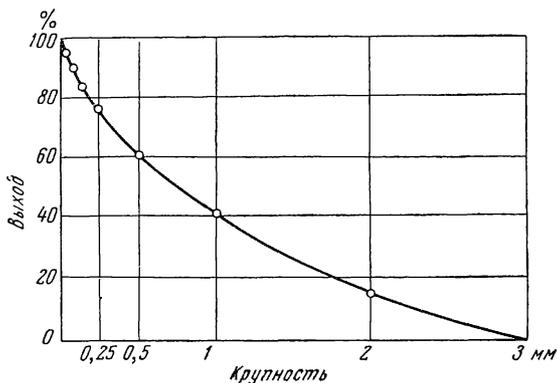


Рис. 41. Кривая ситового анализа угля класса 0—3 мм шахты № 3/5

измельчение угля не оказывает влияния на распределение зольности в классах по крупности. Для определения зольности продуктов обогащения производился отбор проб из концентрата и хвостов.

Для исследования распределения и разделения зерен угля по плотности и крупности в разных точках гидроциклона использовалась проба угля шахты № 3/5 треста Советскуголь (Донбасс) крупностью 0—3 мм.

В пробе угля содержалось 23,1% мелких классов крупностью — 0,25 мм, зольность 21,42% (табл. 12).

Кривые ситового анализа исследуемого угля приведены на рис. 41, а кривые обогатимости — на рис. 42.

При прохождении угля через обогатительные аппараты, в том числе и гидроциклоны, происходит некоторое истирание и разрушение отдельных зерен. В связи с этим были проведены испытания по измельчаемости угля при прохождении его через питающий насос и гидроциклон и установлению времени нахождения угля в гидроциклоне,

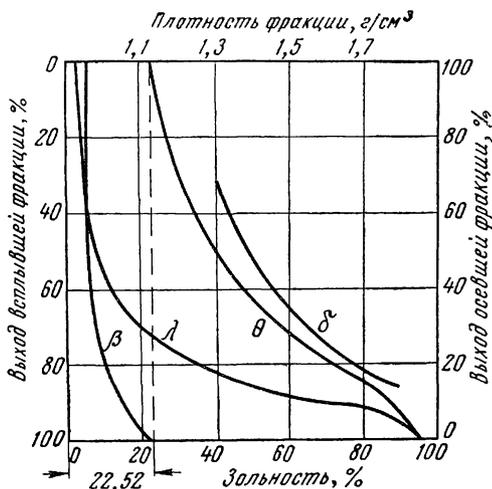


Рис. 42. Кривые обогатимости угля класса 0—3 мм шахты № 3/5:

β — кривая всплывших фракций; λ — элементарная кривая распределения зольности; θ — кривая утонувших фракций; δ — кривая плотностей разделения

Изменение крупности угля при прохождении через насос и гидроциклон (диаметр гидроциклона 80 мм, угол конусности 45°, диаметр сливного отверстия 48 мм, диаметр насадки 8 мм, длина сливной трубки 35 мм, площадь отверстия питающего патрубка 0,785 см², давление питания 2,2 атм)

Класс, мм	Исходная проба		Продолжительность измельчения, мин							
			0,5		1,0		1,5		2,0	
	Выход, %									
	от операции	суммарный	от операции	суммарный	от операции	суммарный	от операции	суммарный	от операции	суммарный
2—3	16,6	16,6	12,3	12,3	8,8	8,8	4,3	4,3	2,3	2,3
1—2	21,3	37,9	16,6	28,9	17,4	26,2	10,3	14,6	7,4	9,7
0,5—1	23,2	61,1	25,3	54,2	26,2	52,4	27,7	42,3	25,3	35,0
0,25—0,5	15,8	76,9	15,7	69,9	16,1	68,5	19,6	61,9	20,9	55,9
0,15—0,25	5,2	82,1	9,4	79,3	7,9	76,4	8,2	70,1	8,9	64,8
0,1—0,15	8,4	90,5	5,8	85,1	5,6	82,0	8,5	78,6	9,6	74,4
0,074—0,1	3,1	93,6	2,9	88,0	2,4	84,4	4,9	83,5	7,4	81,8
—0,074	6,4	100,0	12,0	100,0	15,6	100,0	16,5	100,0	19,2	100,0
Итого	100,0	—	100,0	—	100,0	—	100,0	—	100,0	—

при котором гранулометрический состав его существенно не меняется. Результаты испытаний приведены в табл. 13 и на рис. 43.

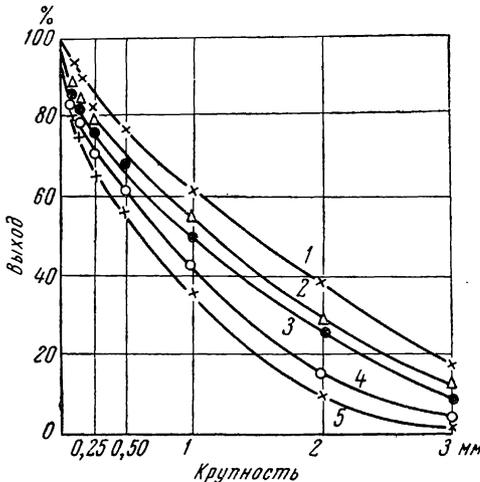


Рис. 43. Измельчаемость угля при прохождении через насос и гидроциклон:

1 — исходная проба угля; 2 — после работы гидроциклона 30 сек; 3 — то же, 1 мин; 4 — то же, 1,5 мин; 5 — то же, 2,0 мин

При прохождении угля через питающий насос и гидроциклон происходит некоторое изменение его гранулометрического состава. Это изменение не является существенным, если время пребывания угля в гидроциклоне меньше одной минуты для угля всех классов, кроме классов 2—3 и —0,74 мм, которые не играют решающей роли в процессе распределения минеральных зерен в гидроциклоне при обогащении угольной мелочи класса 0—3 мм.

Результаты распределения зерен крупностью 0—1 и 0—3 мм приведены в табл. 14 и 15. Изменение

Результаты распределения зерен при обогащении угля класса 0—1 мм (диаметр сливного отверстия 48 мм, диаметр насадки 8 мм, длина сливной трубки 35 мм, площадь отверстия питающего патрубка 0,785 см², давление питания 2,2 атм.)

Зона замера	Диаметр замера, мм	Классы, мм													
		0,5—1		0,25—0,5		0,15—0,25		0,1—0,15		0,074—0,1		—0,074		0—1	
		выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %
<i>Без реагента</i>															
1	40	21,1	15,54	26,5	14,39	14,64	19,8	7,6	15,91	6,0	16,33	19,0	25,07	400,0	16,94
	35	6,5	9,39	24,7	12,60	11,39	10,6	12,85	8,6	14,47	32,3	25,09	100,0	16,35	
2	40	20,0	12,98	29,8	11,58	21,2	7,8	15,08	5,2	17,48	16,0	27,58	100,0	16,35	
	35	18,2	10,33	17,3	11,16	12,92	9,7	15,32	7,8	17,94	22,6	28,58	100,0	16,30	
	30	20,8	9,21	17,1	10,33	10,51	9,0	12,65	9,4	16,15	20,6	28,06	100,0	14,56	
	25	17,2	9,06	27,6	10,82	11,68	8,4	14,26	8,7	19,22	17,7	28,52	100,0	14,87	
3	20	19,4	8,90	28,2	10,96	11,07	7,6	13,56	6,2	16,73	19,2	27,80	100,0	14,37	
	32	27,4	12,12	31,7	23,12	21,1	26,32	7,0	24,79	4,6	29,75	8,2	39,04	100,0	24,98
	25	30,0	16,76	34,1	26,58	20,49	7,2	22,55	3,3	23,11	7,1	31,13	100,0	19,14	
4	20	26,0	12,29	28,1	18,32	19,8	15,37	7,1	17,40	5,3	18,35	13,7	30,06	100,0	16,31
	24	29,2	15,43	29,1	22,71	19,7	18,38	6,8	20,08	4,9	22,08	10,3	31,08	100,0	20,28
	20	23,4	10,09	29,6	10,82	13,32	7,0	16,41	5,2	19,32	13,0	30,86	100,0	14,62	
<i>С реагентом (100 г/т)</i>															
1	40	20,3	15,18	22,7	15,16	14,83	16,6	7,3	14,92	6,2	15,88	26,9	26,24	100,0	18,22
	35	8,4	9,50	17,7	11,46	11,23	18,8	10,3	12,93	9,1	14,96	35,7	25,84	100,0	16,85
2	40	31,8	14,55	24,5	14,26	15,64	16,1	6,0	16,76	4,6	16,36	17,0	36,60	100,0	18,74
	35	23,1	9,40	23,4	9,39	11,26	17,4	7,3	13,30	5,8	14,00	23,0	26,68	100,0	14,25
	30	24,7	8,02	22,3	9,59	10,64	15,9	6,6	12,82	6,0	15,23	24,5	27,50	100,0	14,31
	25	26,2	7,76	22,8	9,18	10,18	16,3	6,9	12,45	5,7	14,31	22,1	27,04	100,0	13,46
	20	27,9	7,20	22,2	7,92	9,24	16,3	6,6	11,20	5,5	14,82	21,9	25,46	100,0	12,29
3	32	29,8	16,63	27,1	19,06	19,56	15,2	9,9	18,28	3,7	21,04	14,3	31,78	100,0	20,22
	25	33,4	15,60	29,5	15,52	15,34	15,0	8,6	16,36	2,8	20,46	10,7	31,16	100,0	17,39
	20	31,5	8,34	30,4	8,96	10,96	12,4	13,3	11,34	2,7	16,00	10,0	28,92	100,0	11,52
4	24	25,7	17,34	26,8	16,42	17,7	17,7	9,4	19,90	3,9	22,42	16,5	31,24	100,0	19,72
	20	28,9	13,44	28,6	14,12	17,14	16,2	9,0	19,26	3,0	22,04	13,7	31,00	100,0	17,50

Результаты распределения зерен при обогащении угля класса
0—3 мм (диаметр сливного отверстия 55 мм, диаметр насадки 10 мм,
длина сливной трубки 45 мм, давление питания 2,2 атм)

Зона замера	Радиус замера, мм	Классы, мм							
		0,15—3		0,074—0,15		—0,074		0—3	
		выход, %	золь- ность, %	выход, %	золь- ность, %	выход, %	золь- ность, %	выход, %	золь- ность, %

Без реагента

1	40	71,3	17,98	17,9	20,25	10,8	26,27	100,0	19,12
	30	56,8	14,34	13,7	15,28	29,5	24,50	100,0	17,46
2	40	72,4	16,97	14,9	16,80	12,7	27,68	100,0	18,30
	35	68,5	16,04	15,2	16,60	16,3	26,42	100,0	17,82
	30	70,6	16,46	13,0	15,60	16,4	26,76	100,0	18,04
	25	67,9	16,15	16,6	16,00	15,5	27,50	100,0	17,88
	20	70,3	16,30	14,8	16,42	14,9	29,06	100,0	18,22
3	30	81,5	27,44	11,3	23,80	7,2	28,12	100,0	26,83
	25	69,9	15,98	18,4	15,12	11,7	32,13	100,0	17,71
	20	75,2	12,67	16,3	15,53	8,5	29,27	100,0	14,55
4	24	80,3	21,32	13,2	29,40	6,5	36,88	100,0	23,41
	20	88,7	15,06	8,2	19,60	3,1	34,84	100,0	16,05

С реагентом (100 г/т)

1	40	75,5	11,95	10,7	11,60	13,8	22,08	100,0	13,31
	30	57,8	9,00	15,6	9,38	26,6	20,60	100,0	12,14
2	40	75,3	13,68	14,6	17,60	10,1	25,85	100,0	15,44
	35	73,0	12,58	7,7	13,26	19,3	23,80	100,0	14,79
	30	66,4	11,16	23,4	9,42	10,2	21,98	100,0	11,85
	25	66,8	9,35	14,5	9,88	18,7	21,03	100,0	11,60
	20	72,6	7,46	7,9	9,12	19,5	20,66	100,0	10,17
3	30	81,2	27,66	11,2	47,88	7,6	41,18	100,0	31,33
	25	81,0	25,20	9,6	32,12	9,4	37,60	100,0	27,02
	20	76,9	10,10	11,1	13,42	12,0	24,82	100,0	12,24
4	24	84,0	20,40	9,5	24,95	6,5	33,14	100,0	21,66
	20	84,3	12,26	11,2	10,84	4,5	23,52	100,0	12,61

выхода отдельных классов и содержания в них золы на разных горизонтальных уровнях гидроциклона представлено на рис. 44 и 45.

Экспериментальное изучение распределения зерен по плотности и крупности при обогащении угля в гидроциклоне в водной среде показывает, что закономерность распределения зерен в разных точках аппарата согласуется с характером изменения сил, действующих на зерна, а также с закономерностями выделения газов из раствора.

В цилиндрической части гидроциклона в зоне, находящейся выше конца сливной трубки, в результате развиваемых больших центробежных сил у стенки гидроциклона концентрируются более

крупные зерна (при обогащении угольной мелочи 0—1 мм классов 0,5—1 и 0,25—0,5 мм). Выход этих классов и содержание в них золы заметно уменьшаются с приближением к сливной трубке. Выход средних классов (0,15—0,25 и 0,1—0,25 мм) с уменьшением радиуса не изменяется, а зольность их несколько понижается.

Зольность тонких классов (—0,10 мм) остается постоянной по всему радиусу гидроциклона, тогда как выход их повышается по мере приближения к сливной трубке, причем более резко возрастает выход класса —0,074 мм.

В цилиндрической части гидроциклона, ниже сливной трубки, где относительное действие центробежной силы возрастает у стенки гидроциклона, а затем резко падает с приближением к оси, выход и зольность крупных классов вблизи стенки аппарата остаются высокими. На некотором расстоянии от стенки происходит снижение выхода и зольности, которые затем не изменяются на всем радиусе.

В верхней и средней зонах конической части гидроциклона при перемещении пульпы в направлении от периферии к осевой зоне относительное действие центробежной силы медленно возрастает. Вследствие этого процесс разделения угольных и породных зерен становится более интенсивным. Наблюдается резкое снижение зольности всех классов (кроме —0,074 мм) по мере их передвижения к границе воздушного столба.

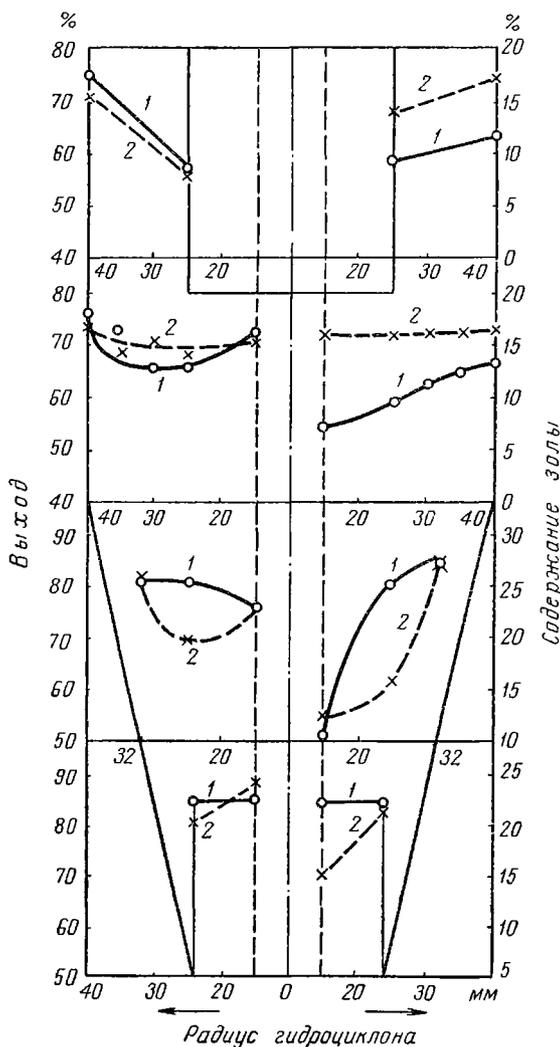


Рис. 44. Изменение зольности угля при обогащении в водной среде (класс 0,15—3 мм):

1 — без реагента; 2 — с реагентом

В зонах, близких к вершине конуса гидроциклона, сосредоточены более зольные частицы. Выход крупных классов достигает 30—35 %, а тонких — значительно снижается.

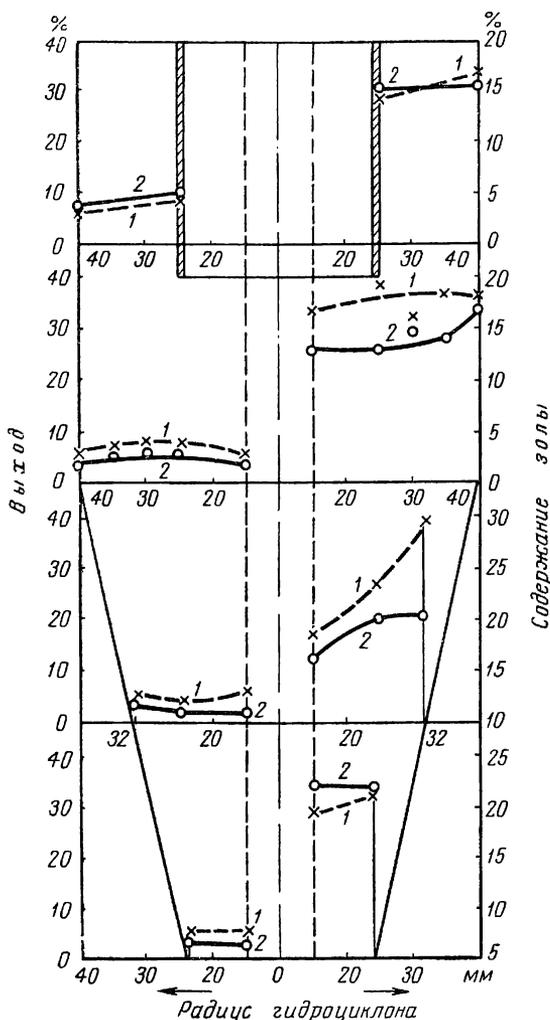


Рис. 45. Изменение зольности угля при обогащении в гидроциклоне в водной среде (класс 0,074—0,1 мм): 1 — без керосина; 2 — с керосином

угля при обогащении его в тяжелых суспензиях в гидроциклонах.

Четкость разделения минеральных зерен по плотности при обогащении угля в гидроциклоне в тяжелых суспензиях значительно повышается по сравнению с разделением в водной среде. При обогащении мелкого угля в гидроциклоне в водной среде, в особенности без применения реагента-гидрофобизатора, создаются такие условия,

При обогащении угольной мелочи в гидроциклоне с применением реагента-гидрофобизатора (100 г/м) распределение зерен по плотности и крупности следует в основной той же закономерности, что и при обогащении без реагента. Однако, как правило, разделение по плотности становится более четким. Особенно эффективное действие реагента наблюдается в средней зоне конической части, где из воды выделяется значительное количество растворенных газов.

В цилиндрической части в зоне, расположенной выше сливной трубки, и у вершины конуса гидроциклона в результате наличия незначительного количества растворенных газов разделение угольных и породных зерен в присутствии реагента не улучшается. Эффективность разделения угля класса —0,074 мм во всех зонах гидроциклона в присутствии реагента остается низкой.

На рис. 46 и 47 показаны изменения зольности

при которых теоретически все минеральные зерна плотностью $>1,0 \text{ г/см}^3$ при их одиночном движении могут отбрасываться центробежной силой к периферии циклона. Практически при стесненных условиях происходит разделение зерен на тяжелые и легкие фракции, которые удаляются из гидроциклона через разгрузочные отверстия. Однако при этом значительное количество зерен промежуточной плотности, для которых относительное действие сил, направленных во внешние зоны, больше, чем сопротивление среды, попадает в нижний продукт. Некоторая часть зерен промежуточной плотности находится в равновесном состоянии под действием сил, определяющих направление движения твердых частиц, и продолжительное время циркулирует в гидроциклоне.

При разделении минеральных зерен в тяжелой суспензии в гидроциклоне происходит возрастание относительной величины сопротивления среды для более тяжелых частиц и уменьшение — для легких. Вследствие этого увеличивается время пребывания в гидроциклоне как породы, так и угольных зерен, в особенности сростков, чем и объясняется значительное повышение эффективности их разделения. По данным ситовых анализов продуктов обогащения видно,

что при обогащении угля крупностью 0—3 мм в гидроциклоне наиболее крупный класс в нижнем продукте является наименее зольным. Так, например, класс 2—3 мм имеет зольность 37,41%, в то время как зольность мелкого класса 0,15—0,25 мм составляет 74,93%. Это объясняется тем, что в гидроциклоне при обогащении угля в водной среде одновременно с разделением по плотности происходит и классификация. Характер распределения зерен в тяжелых суспензиях и в водной среде различен. В случае разделения минералов в тяжелых суспензиях только в верхних зонах циклона происходит увеличение выхода крупных классов на больших радиусах. В нижних

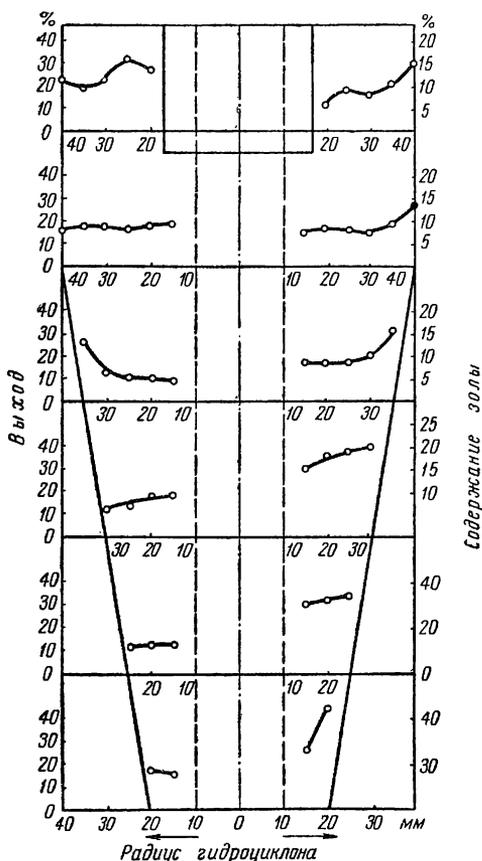


Рис. 46. Изменение зольности угля при обогащении в магнетитовой суспензии (класс 1—2 мм)

зонах по мере перемещения угля к периферии уменьшается выход крупных классов вследствие того, что крупные зерна угля разделяются и уносятся в направлении к осевой зоне. Кривые изменения зольности при обогащении угля в гидроциклоне в магнетитовой суспензии показывают, что наиболее зольные фракции расположены у стенки гидроциклона. С уменьшением радиуса вращения зольность уменьшается как для класса 1—2 мм, так и для класса 0,5—1 мм. Наименьшую зольность имеют пробы угля, отобранные у границы воздушного столба.

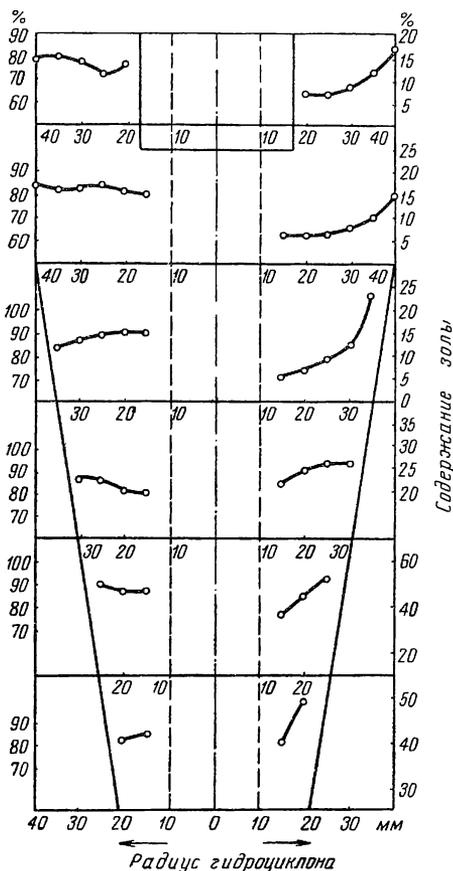


Рис. 47. Изменение зольности угля при обогащении в магнетитовой суспензии (класс 0,5—1 мм)

у стенки гидроциклона. С уменьшением радиуса вращения зольность уменьшается как для класса 1—2 мм, так и для класса 0,5—1 мм. Наименьшую зольность имеют пробы угля, отобранные у границы воздушного столба.

В зоне внешнего потока на различных уровнях по высоте гидроциклона характер распределения зольности изменяется. В цилиндрической части происходит более медленное понижение зольности вдоль радиуса в направлении от стенки гидроциклона к осевой зоне. В конической части на верхнем уровне зольность понижается более резко. В нижних зонах конической части происходит дополнительное разделение зерен. Тяжелые минералы преодолевают сопротивление более плотной среды и разгружаются через насадку, в то время как зерна промежуточной плотности уносятся восходящим потоком вверх, где вследствие уменьшения плотности и вязкости среды часть их снова отбрасывается за пределы восходящего потока, попадает во внешний поток и идет в циркуляцию.

Тарьян [42] с помощью математического расчета определил размер частиц, удаляющихся через верхнее и нижнее разгрузочные отверстия. Он также нашел, что в суспензоиде, уходящем через верхний сливной патрубок, сосредоточены главным образом тонкие частицы. Но наряду с этим в слив могут уходить и более крупные частицы утяжелителя, которые располагаются в пределах линии, соединяющей точки одинаковой вертикальной скорости в гидроциклоне. Эти частицы могут выноситься не сразу, а после некоторой

циркуляции в гидроциклоне, в результате чего повышается плотность суспензии на тех радиусах, где происходит циркуляция.

В цилиндрической части, вблизи кривой постоянной вертикальной скорости, циркулирует около 34% утяжелителя (по весу), а в конической части — около 45%.

3. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ЗЕРЕН

Твердая частица в гидроциклоне находится под действием двух главных сил, определяющих скорость и направление ее движения. Этими силами являются: центробежная сила C , которая всегда направлена к периферии, и сопротивление среды, препятствующее движению частицы в указанном направлении.

Сопротивление среды складывается из сопротивления вязкости S , величина которого определяется по формуле Стокса, и динамического сопротивления P_d в соответствии с законом Ньютона. При равновесном состоянии сил, действующих на твердую частицу, последняя должна находиться во вращательном движении в гидроциклоне. Составим дифференциальное уравнение движения частицы в радиальном направлении:

$$m \frac{du}{dt} = C - (S + P_d).$$

Подставив значение действующих сил для зерна шарообразной формы, получим

$$m \frac{du}{dt} = \frac{\pi d^3 (\rho - \rho_0)}{6} \frac{v_t^2}{r} - \left(3\pi \mu du + k \frac{\pi d^2}{12} \rho_0 u^2 \right). \quad (53)$$

Разделив обе части уравнения на массу $\left(m = \frac{\pi d^3}{6} \rho \right)$, будем иметь

$$\frac{du}{dt} = \frac{(\rho - \rho_0) v_t^2}{r} - \left(\frac{18\mu u}{d^2} + k \frac{\rho_0 u^2}{d} \right). \quad (54)$$

Уравнение (54) показывает, что радиальное ускорение зерна, движущегося в гидроциклоне, состоит из ускорения центробежной силы и ускорения сопротивления среды.

В условиях равновесного состояния зерна в гидроциклоне $\frac{du}{dt} = 0$, тогда

$$\frac{(\rho - \rho_0) v_t}{r} = \frac{18\mu u}{d^2} + k \frac{\rho_0 u^2}{d}. \quad (55)$$

Оба вида сопротивления действуют одновременно, но величины их различны и определяются в зависимости от условий движения. Одновременный учет двух видов сопротивления затруднен, поэтому

рассмотрим движение зерна в условиях действия закона Стокса. Тогда уравнение примет вид

$$\frac{(\rho - \rho_0) v_t^2}{r} = \frac{18\mu u}{d^2}. \quad (56)$$

Из уравнения (56) можно определить величину радиальной скорости твердой частицы:

$$u = v_t^2 \frac{d^2 (\rho - \rho_0)}{18\mu r}, \quad (57)$$

где v_t — тангенциальная скорость частицы;

d — диаметр частицы;

ρ , ρ_0 — соответственно плотности твердой частицы и жидкости;

μ — вязкость среды;

r — радиус вращения твердой частицы.

Для условия действия закона Ньютона получим

$$\frac{(\rho - \rho_0) v_t^2}{r} = k \frac{\rho_0 u^2}{2d},$$

откуда

$$u = k_1 v_t \sqrt{\frac{2d(\rho - \rho_0)}{r\rho_0}}. \quad (58)$$

В табл. 16 приведены величины радиальных скоростей зерен, рассчитанные по формуле (58) при $k = 0,4$.

Т а б л и ц а 16

Радиальные скорости движения твердых частиц угля и породы различной крупности в гидроциклоне (давление на входе 1 атм, диаметр сливной трубки 25 мм, диаметр насадки 10 мм)

Класс, мм	Радиальные скорости, м/сек	
	уголь ($\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$)	порода (кварц) ($\rho = 2,6 \text{ г/см}^3$)

Коническая часть (верхняя зона)

2—3	1,25	2,40
1,4—2	0,98	1,89
1—1,4	0,85	1,63
0,8—1	0,74	1,43
0,5—0,8	0,28	1,12
0,3—0,5	0,04	0,87

Коническая часть (нижняя зона)

2—3	1,58	3,03
1,4—2	1,24	2,38
1—1,4	1,07	2,06
0,8—1	0,94	1,81
0,5—0,8	0,74	1,42
0,3—0,5	0,57	1,10

Величины сил, действующих на зерна угля и породы, подсчитанные по формулам

$$C = \frac{\pi d^3}{6} \frac{(\rho - \rho_0) v_t}{r} \quad (\text{центробежная сила});$$

$$P = k \frac{\pi d^2}{12} \rho_0 v^2 \quad (\text{сопротивление среды}),$$

приведены в табл. 17.

Таблица 17

Величины центробежной силы C и силы сопротивления потока жидкости P , действующих на зерна угля и породы (в динах)

Класс, мм	Уголь			Порода		
	C	P	$C - P$	C	P	$C - P$

Коническая часть (верхняя зона)

2—3	69,7	62,5	+7,2	566,0	230,0	+336,0
1—2	8,8	7,2	+1,6	70,7	26,5	+44,2
0,8—1	4,4	3,5	+0,9	36,1	13,1	+23,0
0,5—0,8	1,1	0,2	+0,9	8,9	3,1	+5,8
0,3—0,5	0,2	0,001	+0,199	1,9	0,7	+1,2

Коническая часть (нижняя зона)

2—3	113,0	99,8	+13,2	905,0	370,0	+535,0
1—2	14,1	11,4	+2,7	113,0	42,5	+70,5
0,8—1	7,2	5,7	+1,5	57,6	21,0	+36,6
0,5—0,8	1,8	1,4	+0,4	14,1	5,0	+9,1
0,3—0,5	0,4	0,3	+0,1	3,1	1,1	+2,0

Результирующая сила для всех зерен угля и породы при их одиночном движении имеет положительный знак. Следовательно, все зерна угля и породы будут отброшены на стенку гидроциклона.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС ОБОГАЩЕНИЯ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для правильной регулировки технологического процесса обогащения углей в гидроциклоне, а также для контроля работы аппарата необходимо установить характер влияния основных факторов на эффективность разделения.

К основным факторам, влияющим на эффективность процесса разделения, относятся: диаметр гидроциклона, давление питания, размер и форма отверстия питания, размеры сливного отверстия, высота сливной трубки, размеры отверстия насадки, угол конусности и высота цилиндрической части гидроциклона. Влияние этих факторов исследовалось в ряде работ. Большинство исследований проведено с гидроциклонами, работающими как аппараты для классификации или для сгущения шламов. Проведены также исследования по обогащению углей с применением тяжелых суспензий.

Наибольший интерес представляют исследования, проведенные Келсаллом [39], Белюгу и Шавловским [30], а также Ван-дер-Вальтом [45].

Наиболее полное исследование влияния основных переменных факторов гидроциклона на эффективность разделения при классификации материала проведено Келсаллом. При исследовании использовались смеси зерен сферической формы одинаковой и определенной плотности и крупности в гидроциклоне диаметром 76 мм.

Основные выводы, сделанные Келсаллом, можно сформулировать следующим образом:

1) уменьшение диаметра питающего отверстия (с 15,9 до 6,3 мм) обеспечивает заметное увеличение эффективности классификации;

2) длинное, узкое, прямоугольное питающее отверстие по сравнению с круглым отверстием равной площади не обеспечивает повышение (значительное) эффективности классификации;

3) лучшая эффективность разделения частиц вероятнее всего получается при максимальной скорости прохождения жидкости через отверстие питания;

4) с уменьшением диаметра сливного отверстия эффективность разделения тонких частиц увеличивается; при классификации более

крупного материала эффективность повышается в случае уменьшения (до определенного предела) диаметра сливного отверстия, при дальнейшем уменьшении диаметра сливного отверстия эффективность разделения падает;

5) уменьшение длины сливной трубки приводит к повышению эффективности разделения тонких частиц и снижению эффективности разделения крупных частиц (иногда до 10% в случае чрезмерного уменьшения длины сливной трубки);

6) уменьшение диаметра насадки снижает эффективность разделения частиц всех размеров;

7) существует определенная зависимость между давлением питания и эффективностью разделения.

Ван-дер-Вальт проводил исследования с углями на гидроциклонах диаметром 240 мм. Исследование обогащения различных классов угля крупностью до 12,5 мм проводилось в тяжелой минеральной суспензии после отсева шламов мельче 0,5 мм. В результате этих исследований Ван-дер-Вальт пришел к следующим выводам:

1) при постоянном давлении уменьшение угла конусности повышает эффективность разделения;

2) при перегрузке насадки или сливной трубки нарушается процесс и эффективность разделения снижается;

3) при уменьшении диаметра сливного отверстия увеличивается время пребывания материала в гидроциклоне, поэтому обогащение мелкого материала лучше проводить с возможно меньшим сливным отверстием;

4) при высоком давлении питания повышается эффективность разделения мелких частиц;

5) при использовании сливной трубки малой длины большое количество исходного материала проходит непосредственно через сливное отверстие, вследствие чего уменьшается эффективность разделения;

6) отношение $Ж : Т$ в питании (в определенных пределах) не влияет на характер работы гидроциклона, но минимальное отношение $Ж : Т$ должно быть равно 3 : 1;

7) количество материала, проходящего через разгрузочную насадку, может увеличиваться от повышения давления, а также и от увеличения диаметра насадки, однако линейной зависимости между диаметром насадки и количеством материала, разгружаемого через эту насадку, не существует;

8) угол конусности является одним из важнейших факторов, влияющих на работу гидроциклона.

Белюгу и Шавловский исследовали обогатимость угля в гидроциклоне с применением тяжелой суспензии, состоящей из барита и угольной породы.

Опыты проводились в гидроциклонах диаметром 75, 150, 350 и 500 мм. В гидроциклоне диаметром 75 мм необходимое давление питания обеспечивалось сжатым воздухом.

Влияние переменных факторов на эффективность обогащения исследовалось на гидроциклонах диаметрами 75 и 150 мм. В результате этих исследований Белюгу и Шавловский пришли к выводу, что высота цилиндрической части гидроциклона, угол конусности и высота сливной трубки не оказывают существенного влияния на эффективность обогащения. Они также считают, что степень обогатимости угля не влияет на результаты обогащения. Трудно-обогатимый уголь обогащается в гидроциклоне так же, как и легко-обогатимый.

При исследованиях Белюгу и Шавловского, а также Кригсмана лучшие результаты обогащения угля были получены в тех случаях, когда плотность разделения была близка к плотности суспензии.

Ниже рассматриваются результаты исследований по установлению влияния каждого из основных факторов на процесс разделения минеральных зерен в гидроциклоне при обогащении угля крупностью — 3 мм, полученные автором.

2. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Давление питания определяет количество потока, проходящего через гидроциклон, обуславливает скорость движения жидкости и твердых частиц и определяет время пребывания материала в аппарате. Поэтому давление питания играет важную роль в определении производительности гидроциклона и эффективности обогащения. Давление питания при обогащении угля в гидроциклоне обычно изменяется в пределах от 0,5 до 3,0 *ати*. Такое давление обеспечивается применяемыми на обогатительных фабриках центробежными песковыми насосами.

По опубликованным данным [15], увеличение давления питания с 1,4 до 3,0 *ати* вызывает повышение производительности гидроциклона на 65% (при использовании его в качестве сгустительного аппарата).

Результаты работы некоторых зарубежных исследователей говорят о значительном повышении производительности гидроциклона при увеличении давления.

Ван-дер-Вальт [45] считает, что давление питания не оказывает влияния на эффективность обогащения относительно крупного материала и играет важную роль только при обогащении тонких классов. Однако он отмечает, что давление питания должно быть тем выше, чем больше содержание тонких классов — 0,048 мм, для того, чтобы достигнуть наибольшей эффективности обогащения.

Фитч и Джонсон [33] считают, что удвоение давления питания дает уменьшение крупности разделения в гидроциклоне примерно на 16%. Указывается, что заметное изменение результатов обогащения в гидроциклоне происходит при изменениях давления в больших пределах.

Повышение давления особенно необходимо при наличии вязкой среды в гидроциклоне, так как при этом потребуются центробежная

сила большей величины для того, чтобы твердые частицы смогли продвигаться через вязкую пульпу по направлению к стенке гидроциклона. Для нормального протекания процесса обогащения в гидроциклоне важно также соблюдение постоянства давления питания. Поэтому желательно, чтобы центробежный насос имел максимальную производительность, а высота уровня жидкости в зумпфе перед насосом поддерживалась постоянной.

При помощи простого устройства можно автоматически поддерживать высоту уровня жидкости в зумпфе. Как показано на

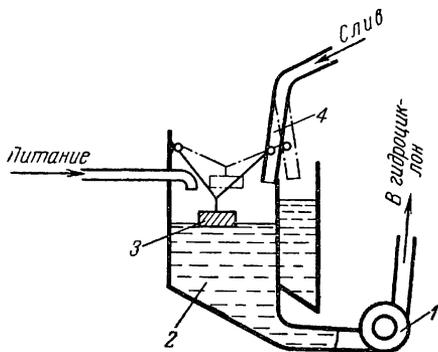


Рис. 48. Схема автоматической регулировки уровня жидкости в зумпфе:

1 — центробежный насос; 2 — зумпф; 3 — поплавок; 4 — резиновый наконечник трубы; 5 — сливной желоб

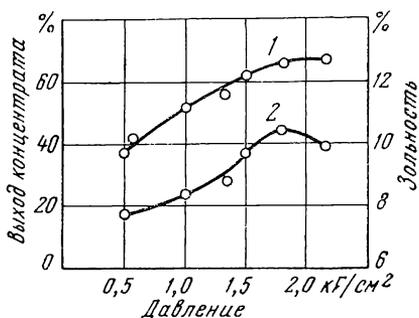


Рис. 49. Влияние давления на выход концентрата:

1 — выход концентрата; 2 — зольность концентрата

рис. 48, поплавок 3 шарнирно прикреплен к стенке и к резиновому наконечнику патрубка. При понижении уровня жидкости в зумпфе 2 поплавок опускается и тянет за собой резиновый наконечник 4, из наконечника жидкость сливается в зумпф 2. По мере наполнения зумпфа поплавок поднимается, происходит отталкивание резинового наконечника вправо, вследствие чего прекращается поступление жидкости в зумпф насоса 1.

Для установления влияния давления питания на эффективность обогащения проводились исследования с углем крупностью 0,5—3 мм. Давление изменялось в пределах от 0,5 до 2,2 атм. Результаты исследований приведены в табл. 18, а влияния давления на эффективность обогащения показано на рис. 49, откуда видно, что повышение давления питания увеличивает выход концентрата. Однако при значительном изменении выхода концентрата не происходит существенного изменения зольности его, которая во всех случаях составляет 8,5—10,5%.

Количественная эффективность обогащения резко повышается при более высоких давлениях питания, в то время как качественная изменяется в очень небольших пределах. Общая эффективность обогащения также улучшается с повышением давления питания. Следовательно, давление питания влияет как на производительность

Результаты обогащения угля при различных давлениях питания
 [диаметр гидроциклона 76 мм; диаметр сливного отверстия 45 мм;
 диаметр насадки 8 мм; угол конусности 45°; Ж : Т = 10 : 1;
 крупность угля 0,5—3 мм (дробленый класс)]

Давле- ние пита- ния, ати	Продукт	Выход, %	Золь- ность, %	Содержа- ние серы, %	Эффектив- ность обогаще- ния (общая), %
0,5	Концентрат	38,2	7,80	—	49,0
	Хвосты	61,8	29,50	—	
	Исходный	100,0	21,30	—	
1,0	Концентрат	51,0	8,50	4,90	53,0
	Хвосты	49,0	31,92	8,74	
	Исходный	100,0	19,94	6,80	
1,3	Концентрат	56,7	8,78	5,24	69,0
	Хвосты	43,3	37,00	9,00	
	Исходный	100,0	21,50	6,86	
1,5	Концентрат	60,5	9,76	5,02	
	Хвосты	39,5	35,01	9,45	
	Исходный	100,0	19,70	6,80	
1,8	Концентрат	69,5	10,50	5,34	67,0
	Хвосты	30,5	39,00	9,95	
	Исходный	100,0	19,00	6,70	
2,2	Концентрат	70,3	9,80	5,24	61,0
	Хвосты	29,7	39,04	9,00	
	Исходный	100,0	18,49	6,35	

гидроциклона, так и на эффективность обогащения, при этом влияние его на производительность аппарата более значительно.

Производительность гидроциклона может быть рассмотрена как функция ряда переменных величин, из которых основными являются давление питания, размеры питающего и разгрузочных отверстий и угол конусности. Кроме того, производительность зависит от характера обрабатываемого материала.

При постоянном давлении на входе количество пульпы, прошедшей через гидроциклон, возрастает с увеличением размера входного отверстия. Однако линейной зависимости между площадью отверстия и производительностью гидроциклона не наблюдается.

Уменьшение размеров разгрузочных отверстий вызывает повышение сопротивления потоку жидкости, вследствие чего падает производительность гидроциклона.

Так как основная масса жидкости покидает гидроциклон через сливное отверстие, изменение диаметра разгрузочной насадки в опти-

мальных пределах оказывает незначительное влияние на производительность гидроциклона.

Производительность находится также в зависимости от диаметра и длины гидроциклона, изменение которых уменьшает или увеличивает сопротивление движущемуся потоку.

Экспериментально установлено, что с уменьшением угла конусности и с увеличением длины цилиндрической части циклона повышается его производительность.

3. ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРОВ РАЗГРУЗОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ

Размеры сливного и разгрузочного отверстий оказывают значительное влияние на эффективность обогащения угля в гидроциклоне. Характер этого влияния, по данным ряда исследований, различный.

Келсалл считает, что увеличение диаметра сливного отверстия ухудшает разделение частиц в гидроциклоне [38, 39]; Ван-дер-Вальт [45], Белюгу и Шавловский [30] пришли к заключению, что эффек-

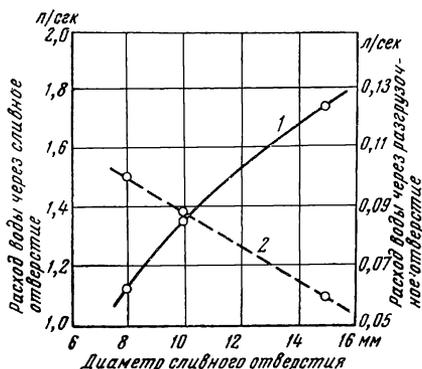


Рис. 50. Расход воды через сливное и разгрузочное отверстия при различных диаметрах сливного отверстия:

1 — расход воды через сливное отверстие; 2 — расход воды через разгрузочное отверстие

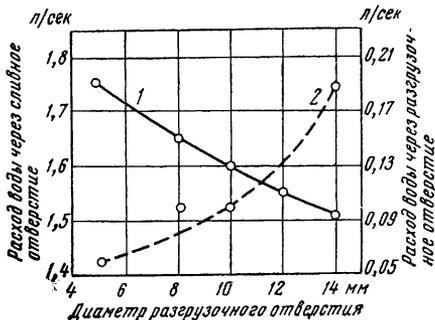


Рис. 51. Расход воды через сливное и разгрузочное отверстия при различных диаметрах разгрузочного отверстия:

1 — расход воды через сливное отверстие; 2 — расход воды через разгрузочное отверстие

тивность обогащения угля повышается с увеличением диаметра сливного отверстия, но при обогащении мелкого угля она снижается. Однако при этом не указываются размеры классов угля.

Эксперименты не подтверждают высказывания Ван-дер-Вальта о том, что количество воды, проходящей через сливное отверстие, изменяется в линейной зависимости от диаметра насадки. При различных соотношениях диаметров сливного отверстия и насадки имеет место различная зависимость, которая только в отдельных случаях может быть действительно линейной.

С уменьшением диаметра насадки количество воды, проходящей через насадку, уменьшается, а количество воды, проходящей через сливное отверстие, увеличивается (табл. 19, рис. 50 и 51).

Т а б л и ц а 19

Расход воды через сливное отверстие и насадку при их различных размерах (диаметр гидроциклона 76 мм, угол конусности 60°, давление питания 2,2 ати)

Диаметр, мм		Площадь отверстий, см ²		Расход воды, л/сек	
сливной трубки	насадки	сливной трубки	насадки	через сливную трубку	через насадку
15	5	1,770	0,190	1,75	0,061
10	5	0,785	0,190	1,36	0,087
8	5	0,485	0,190	1,12	0,101
15	10	1,770	0,785	1,60	0,110
8	10	0,485	0,785	1,22	0,259
5	10	0,190	0,785	0,90	0,418
15	5	1,770	0,190	1,75	0,060
15	8	1,770	0,485	1,65	0,100
15	10	1,770	0,785	1,60	0,100
15	12	1,770	1,130	1,55	0,140
15	14	1,770	1,540	1,51	0,190
15	18	1,770	2,550	1,47	0,400
10	2	0,785	0,030	1,08	0,031
10	5	0,785	0,190	1,36	0,137
10	8	0,785	0,485	1,25	0,220
10	12	0,785	1,130	1,20	0,308

Расход воды через насадку увеличивается с уменьшением сливного отверстия.

Характер распределения твердых частиц в гидроциклоне определяется соотношением действующих сил, при прочих равных условиях, величины которых изменяются в зависимости от размеров сливного отверстия и насадки. Изменением размеров разгрузочных отверстий можно достичь увеличения или уменьшения не только выхода продуктов обогащения, но и количества материала, циркулирующего в гидроциклоне.

Т а б л и ц а 20

Количество твердого материала, оставшегося в гидроциклоне при обогащении угля (диаметр гидроциклона 76 мм, угол конусности 60°, давление питания 2,2 ати крупность угля 0,5—3 мм, диаметр сливного отверстия 45 мм, зольность — 13,1%)

Диаметр насадки, мм	Количество материала, % от исходной пробы	Зольность материала в гидроциклоне, %
20	0,75	13,6
14	1,20	16,2
12	1,40	—
10	1,60	32,3
8	2,20	36,3

При обогащении угля в гидроциклоне количество материала, оставшегося в аппарате, увеличивается с уменьшением размера диаметра отверстия насадки (при постоянном диаметре сливного отверстия) (табл. 20, рис. 52).

Качественная характеристика материала, циркулирующего в гидроциклоне, также зависит от диаметра насадки. Чем меньше диаметр, тем крупнее материал, оставшийся в циркуляции, и тем выше его зольность.

Основная масса твердого материала, оставшегося в гидроциклоне, концентрируется в нижних зонах конической части аппарата, в особенности вблизи отверстия насадки, образуя более плотную суспензию, что способствует улучшению процесса разделения и повышению эффективности обогащения.

Результаты обогащения угля при различных размерах разгрузочной насадки приводятся в табл. 21, 22 и 23, а влияние диаметров насадки и сливного отверстия на результаты обогащения показаны на рис. 53 и 54.

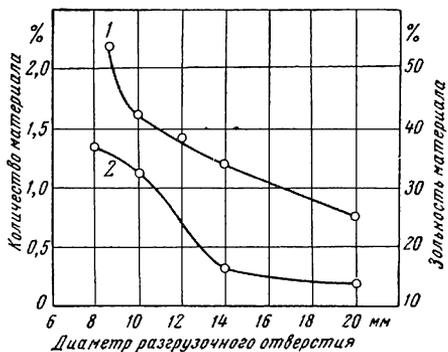


Рис. 52. Влияние диаметра разгрузочного отверстия на количество материала, циркулирующего в гидроциклоне:

1 — количество материала; 2 — зольность материала

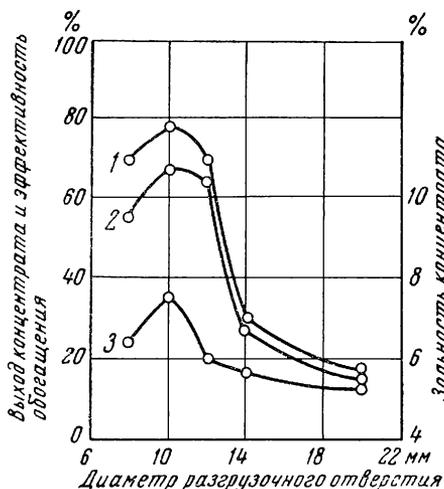


Рис. 53. Влияние диаметра разгрузочного отверстия на выход концентрата и эффективность обогащения:

1 — выход концентрата; 2 — эффективность обогащения; 3 — зольность концентрата

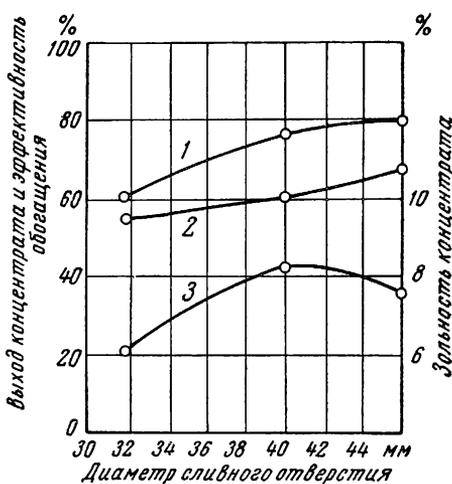


Рис. 54. Влияние диаметра сливного отверстия на эффективность обогащения:

1 — выход концентрата; 2 — эффективность обогащения; 3 — зольность концентрата

Результаты обогащения угля при различных диаметрах разгрузочной насадки (диаметр гидроциклона 76 мм, диаметр сливного отверстия 45 мм, угол конусности 60°, давление питания 2,2 атм, Ж : Т = 10 : 1, крупность угля 0—3 мм)

Диаметр насадки, мм	Продукт	Выход, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Эффективность обогащения, (общая), %
20	Концентрат	17,0	5,20	—	16,0
	Остаток	83,0	15,20	—	
	Исходный	100,0	13,50	—	
14	Концентрат	30,0	5,60	—	28,0
	Остаток	70,0	15,80	—	
	Исходный	100,0	13,50	—	
12	Концентрат	68,5	6,00	3,84	64,0
	Остаток	31,5	28,94	7,54	
	Исходный	100,0	13,26	5,00	
10	Концентрат	78,5	7,55	3,97	67,0
	Остаток	21,5	40,50	8,55	
	Исходный	100,0	14,60	4,94	
8	Концентрат	69,6	6,24	4,02	55,0
	Остаток	30,4	27,50	7,40	
	Исходный	100,0	12,60	4,93	

Увеличение диаметра сливного отверстия сокращает время пребывания обогащаемого материала в гидроциклоне, что особенно нежелательно при обогащении мелкого угля, для успешного разделения которого требуется более продолжительное пребывание его в гидроциклоне. Следовательно, для получения наибольшей эффективности обогащения мелкого угля можно было бы рекомендовать применение сливного отверстия возможно меньшего размера, если бы при этом не происходило уменьшение производительности гидроциклона.

С уменьшением диаметра насадки до некоторого предела зольность концентрата уменьшается. При дальнейшем же уменьшении диаметра насадки зольность концентрата заметно повышается.

Эффективность процесса разделения в гидроциклоне, при прочих равных условиях, обуславливается отношением диаметров разгрузочных отверстий. Минимальный выход концентрата получается при наименьшем отношении диаметров сливного отверстия d_0 и насадки d_n , равном 2,0—2,4 (рис. 55). С увеличением отношения d_0/d_n выход концентрата резко повышается и качество его заметно ухудшается.

Таким образом, для получения наилучших результатов регулировку гидроциклона можно осуществлять одновременным изменением диаметров насадки и сливного отверстия или только одного из этих параметров.

Результаты обогащения угля при различных диаметрах сливной трубки (диаметр гидроциклона 76 мм, диаметр насадки 10 мм, угол конусности 60°, давление питания 2,2 ати, крупность угля 0—3 мм)

Диаметр сливного отверстия, мм	Продукт	Выход, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Эффективность обогащения, (общая), %
160	Концентрат	94,0	15,00	—	—
	Остаток	6,0	27,30	—	
	Исходный	100,0	15,70	—	
140	Концентрат	91,6	13,40	—	—
	Остаток	8,4	37,60	—	
	Исходный	100,0	15,50	—	
120	Концентрат	76,5	12,30	—	—
	Остаток	23,5	24,20	—	
	Исходный	100,0	15,10	—	
45	Концентрат	78,5	7,55	3,97	67,0
	Остаток	21,5	40,50	8,55	
	Исходный	100,0	14,60	4,94	
40	Концентрат	76,5	8,31	4,14	—
	Остаток	23,5	34,46	7,70	
	Исходный	100,0	14,65	4,97	
32	Концентрат	60,0	6,17	3,87	—
	Остаток	40,0	24,92	6,73	
	Исходный	100,0	13,65	5,00	

Т а б л и ц а 23

Влияние диаметра насадки на изменение выхода и зольности продуктов обогащения (диаметр гидроциклона 400 мм, давление 1,7 ати, диаметр сливной трубки 140 мм, угол конусности 45°)

Диаметр насадки, мм	Показатели, %	Концентрат	Промпродукт	Исходный
20	Выход	98,6	1,4	100,0
	Зольность	15,15	48,4	16,72
30	Выход	96,5	3,5	100,0
	Зольность	14,51	43,88	16,45
50	Выход	82,1	17,9	13,02
	Зольность	13,02	29,16	15,91
60	Выход	79,3	20,7	100,0
	Зольность	12,7	22,2	15,72
90	Выход	73,8	26,2	100,0
	Зольность	13,7	20,31	15,43

Следует иметь в виду, что между размерами сливного отверстия и насадки и выходом продуктов обогащения через эти отверстия

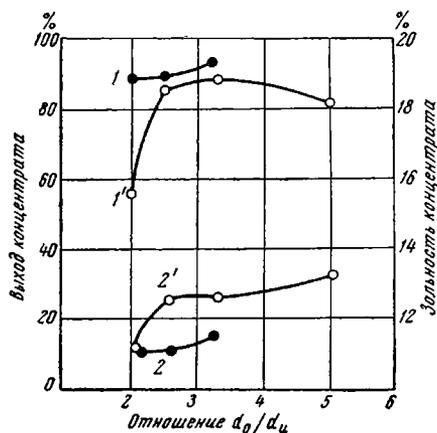


Рис. 55. Влияние отношения диаметров сливного d_0 и разгрузочного d_u отверстий на результаты обогащения угля в гидроциклонах:

1 — выход концентрата в вертикальном гидроциклоне; 1' — то же, в горизонтальном; 2 — зольность концентрата в вертикальном гидроциклоне; 2' — то же, в горизонтальном

не существует линейной зависимости, так как выход продуктов обогащения обуславливается не только размерами разгрузочных отверстий гидроциклона, но и характером обогащаемого материала (гранулометрическим составом, зольностью, характером распределения зольности и др.).

Оптимальные размеры сливного отверстия и насадки, а также соотношение этих размеров должны быть определены экспериментальным путем. При этом следует иметь в виду, что диаметр насадки должен быть не менее трехкратного размера зерен максимальной крупности обрабатываемого материала, а размер сливного отверстия таким, чтобы обеспечивать максимальную производительность гидроциклона.

4. ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ СЛИВНОЙ ТРУБКИ

Длина сливной трубки оказывает существенное влияние на результаты обогащения в гидроциклоне. При малой длине трубки (вследствие близости сливного отверстия к отверстию питания) возможен переход необогащенного угля из питания в концентрат, а при слишком большой в него может перейти некоторая часть тяжелых фракций из нижней зоны гидроциклона. Исследования показывают (табл. 24), что наибольшая эффективность обогащения получена в том случае, когда конец сливной трубки находится ниже отверстия питания. Эффективность обогащения уменьшается, если длина сливной трубки больше высоты цилиндрической части гидроциклона, т. е. если нижний конец трубки входит в коническую часть гидроциклона. Чтобы объяснить причину ухудшения результатов обогащения в последнем случае, рассмотрим поведение минеральных зерен в гидроциклоне.

Некоторые твердые частицы при определенных условиях довольно продолжительное время циркулируют в гидроциклоне на стыке его цилиндрической и конической частей, вращаясь по орбите, которая то приближается к стенке циклона, то удаляется от нее на большее расстояние, что можно наблюдать в прозрачном гидроциклоне.

Если конец сливной трубки находится выше этого уровня, часть материала, представленного преимущественно крупными уголь-

Результаты обогащения угля при различной длине сливной трубки (диаметр гидроциклона 100 мм, диаметр сливного отверстия 70 мм, диаметр насадки 8 мм, давление питания 1,5 атм, угол конусности 60°, положение гидроциклона вертикальное)

Длина сливной трубки, мм	Продукт	Выход, %	Зольность, %	Эффективность обогащения (общая), %
40	Концентрат	11,0	4,0	27
	Шламы	28,5	11,4	
	Остаток	60,5	19,1	
	Исходный	100,0	15,3	
60	Концентрат	38,3	5,5	84
	Шламы	37,1	12,4	
	Остаток	24,6	35,6	
	Исходный	100,0	15,5	
90	Концентрат	32,1	6,3	70
	Шламы	34,0	11,8	
	Остаток	33,9	28,1	
	Исходный	100,0	15,6	
115	Концентрат	65,9	6,9	73
	Шламы	21,7	18,5	
	Остаток	12,4	50,9	
	Исходный	100,0	14,9	

ными зернами и сростками, циркулирующего в рассматриваемой зоне аппарата, может попасть в трубку и уйти через сливное отверстие. Если же конец трубки находится ниже этой зоны, то эти зерна не уходят через сливное отверстие, а несколько опускаются вниз и попадают в коническую часть (где вследствие уменьшения радиуса вращения усиливается действие центробежной силы), прижимаются к стенке конуса, спускаются к его вершине и разгружаются через насадку.

Следовательно, в том случае, когда конец сливной трубки входит в коническую часть, более крупные зерна угля в большом количестве могут попасть в отходы, в результате чего уменьшается выход концентрата и снижается эффективность обогащения.

5. ВЛИЯНИЕ УГЛА КОНУСНОСТИ

С изменением угла конусности увеличивается или уменьшается емкость гидроциклона и изменяется время пребывания угля в нем.

При увеличении угла конусности происходит значительное повышение выхода концентрата при незначительном снижении его качества (табл. 25).

С увеличением угла конусности сокращается время пребывания обогащаемого материала в гидроциклоне, однако эффективность

Влияние угла конусности гидроциклона на эффективность обогащения угля (диаметр гидроциклона 76 мм, диаметр сливного отверстия 45 мм, диаметр насадки 8 мм, давление питания 2,2 атм, Ж : Т = 10 : 1, крупность угля 0,5—3 мм)

Угол конусности, град	Продукт	Выход, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Эффективность обогащения (общая), %
70	Концентрат	80,0	6,91	4,12	60
	Остаток	20,0	38,70	9,24	
	Исходный	100,0	13,20	5,15	
60	Концентрат	69,6	6,21	4,02	55
	Остаток	30,4	27,50	7,40	
	Исходный	100,0	12,60	4,93	
45	Концентрат	37,5	5,25	3,60	42
	Остаток	62,5	20,80	6,53	
	Исходный	100,0	14,87	5,43	
20	Концентрат	4,4	6,25	—	35
	Остаток	95,6	15,00	—	
	Исходный	100,0	14,57	—	
10	Концентрат	4,0	6,70	—	33
	Остаток	96,0	15,60	—	
	Исходный	100,0	12,22	—	

обогащения при этом не снижается. Исследованиями установлено, что при обогащении угольной мелочи в водной среде лучших результатов можно ожидать при угле конусности гидроциклона 45—70°, а иногда и больше.

6. ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА

С увеличением диаметра гидроциклона повышается его производительность. По данным Шавловского, гидроциклон диаметром 150 мм имеет производительность 2,5 т/ч.

При больших диаметрах гидроциклонов, работающих на средних давлениях, влияние силы тяжести может быть значительным. В этом случае более тяжелые частицы, циркулирующие в циклоне, под действием силы тяжести могут опускаться к вершине конуса и разгружаться через насадку, а более легкие попадут в восходящий поток и унесутся в концентрат. При установке гидроциклона в горизонтальном положении влияние силы тяжести на процесс разделения при средних и низких давлениях также может быть значительным. При этом более тяжелые частицы циркулирующего продукта под действием силы тяжести концентрируются в основном в нижней зоне гидроциклона и, осаждаясь, быстрее достигают разгрузочной

насадки. При работе гидроциклона в горизонтальном положении увеличивается количество материала, проходящего через сливное отверстие, и уменьшается количество материала, разгружающегося через насадку.

Следовательно, при работе гидроциклона, установленного в горизонтальном положении, можно получить одинаковый выход кон-

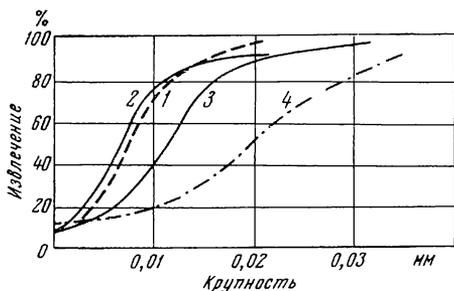


Рис. 56. Влияние диаметра гидроциклона на эффективность обогащения угля:

1 — $D = 25$ мм; 2 — $D = 75$ мм; 3 — $D = 100$ мм; 4 — $D = 200$ мм

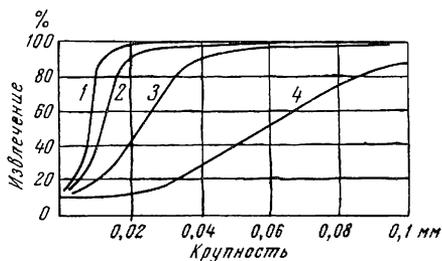


Рис. 57. Влияние диаметра гидроциклона на эффективность осветления обрабатываемой пульпы:

1 — кривая оптимального осветления в гидроциклоне диаметром 38 мм; 2 — то же, диаметром 72 мм; 3 — то же, диаметром 203 мм; 4 — то же, диаметром 356 мм

центрата при разгрузочной насадке большего диаметра, чем это было у гидроциклона, установленного в вертикальном положении, при этом же диаметре сливного отверстия.

На гидроциклоне меньшего диаметра, при прочих равных условиях, получаются лучшие результаты разделения материала по крупности (рис. 56) и плотности, а также по осветлению пульпы (рис. 57).

7. ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ И ДРУГИХ ФАКТОРОВ

Перегрузка гидроциклона нарушает технологический процесс обогащения. При малом диаметре сливного отверстия некоторая часть угольных зерен будет продолжительное время циркулировать в гидроциклоне и может уйти вместе с породой через насадку. В случае чрезмерно малого диаметра разгрузочной насадки увеличится количество породных зерен в концентрате.

Процесс обогащения нарушается также при одновременной перегрузке сливного отверстия и насадки.

Равномерное питание гидроциклона, как и любого другого обогатительного аппарата, является одним из необходимых условий нормальной работы и сохранения устойчивости процесса. Опыты показали, что неравномерная нагрузка оказывает влияние на результаты обогащения угля в гидроциклоне.

Для определения влияния количества пульпы на эффективность обогащения проведена серия опытов, результаты которой приведены в табл. 26.

Результаты обогащения первичного шлама при различной производительности гидроциклона (диаметр гидроциклона 100 мм, диаметр сливной трубки 60 мм, диаметр насадки 12 мм, угол конусности 45°, давление питания 2,2 атм, Ж : Т = 10 : 1, крупность угля 0,3 мм)

Производительность на 1 мм диаметра сливного отверстия, т/ч	Продукт	Выход, %	Зольность, %	Эффективность обогащения (общая), %
0,05	Концентрат	66,3	14,20	47
	Остаток	33,7	38,20	
	Исходный	100,0	22,20	
0,12	Концентрат	79,0	12,60	48
	Остаток	21,0	34,60	
	Исходный	100,0	17,00	
0,4	Концентрат	82,0	13,32	49
	Остаток	18,0	41,58	
	Исходный	100,0	18,40	
1,0	Концентрат	85,2	13,70	50
	Остаток	14,8	45,00	
	Исходный	100,0	18,35	
2,0	Концентрат	82,7	14,62	44
	Остаток	17,3	42,26	
	Исходный	100,0	19,40	

По данным этой таблицы видно, что изменение количества пульпы в исследуемых пределах не оказывает существенного влияния на эффективность обогащения угля.

Эффективность обогащения несколько повышается при уменьшении количества пульпы и достигает наибольшего значения при нагрузке 1,0 т/ч. В качестве показателя нагрузки можно принять количество тонн в час на 1 мм диаметра сливного отверстия или насадки, хотя известно, что этот показатель будет не совсем точным, так как не существует линейной зависимости между диаметром сливного отверстия или насадки и количеством продукта, проходящего через эти отверстия.

При наших испытаниях в производственных условиях нагрузка на 1 мм диаметра в случае наибольшей эффективности обогащения в среднем для насадки составляет 0,12—0,13 т/ч, для сливного отверстия — 0,1—0,11 т/ч.

На процесс обогащения в гидроциклоне влияют также размеры питающего отверстия и отношение Ж : Т в поступающей пульпе.

Эффективность обогащения угля в гидроциклоне снижается в том случае, если Ж : Т меньше 2 : 1. Но так как увеличение количества воды по отношению к твердому материалу, поступающему в гидроциклон, снижает производительность, нельзя допускать

слишком высокие отношения $Ж : Т$. При обогащении угля в гидроциклоне желательнее иметь $Ж : Т = 2 : 1 \div 3 : 1$.

Эффективность обогащения угля и производительность гидроциклона зависят от диаметра входного отверстия.

Чем больше входное отверстие, тем больше количество пульпы, поступающей в гидроциклон, т. е. тем больше производительность при одном и том же давлении питания.

При большом входном отверстии разница между скоростью движения в питающем патрубке и скоростью вращения ее в гидроциклоне будет небольшой и гидроциклон будет работать более ритмично.

Диаметр входного отверстия влияет на гидродинамику потоков в гидроциклоне и изменяет величину тангенциальной и радиальной скоростей.

Путь движения твердой частицы в гидроциклоне определяется величиной центробежной силы, действующей в радиальном направлении от оси гидроциклона к его стенкам, и силой потока жидкости, движущейся в обратном направлении.

8. ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВКИ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Наиболее простым способом регулировки гидроциклона является изменение размера отверстия разгрузочной насадки, которое осуществляется вручную или автоматически. Ручная регулировка производится установкой колец разного диаметра, а также резинового кольца, которое сжимается стяжными болтами или специальной стальной муфтой при помощи маховика.

Автоматическая регулировка обеспечивает постоянное качество продукта, разгружаемого через насадку, и сохраняет точность разделения материала.

Автоматическая регулировка работы гидроциклона основана на поддержании в его осевой части определенного разряжения путем изменения размера отверстия насадки. Качество продукта, разгружаемого через насадку (крупность, плотность и влажность), связано с изменением разряжения в осевой зоне гидроциклона. Например, при работе гидроциклона как сгустителя изменение вакуума в нем на 25—30 мм рт. ст. соответствует изменению содержания твердого в песковой фракции на 1%. Существует несколько способов автоматической регулировки.

По схеме, изображенной на рис. 58, а, регулировка осуществляется с помощью контрольной трубки 1, вставленной в гидроциклон через верхнее отверстие резинового зажимного клапана 2, представляющего собой резиновое кольцо, и пневматического измерительно-регулирующего прибора 3, в который вмонтирован механизм выдержки времени. Регулировкой подачи сжатого воздуха в резиновое кольцо вызывается его сжатие или растяжение, что приводит к уменьшению или увеличению отверстия насадки. Изменение сечения отверстия насадки влияет на величину вакуума

в воздушном столбе гидроциклона. Эти колебания передаются через контрольную трубку 1 в измерительно-регулирующий прибор 3, который через вентиль 4 связан также с трубопроводом сжатого воздуха. При уменьшении вакуума в воздушном столбе вентиль 4 открывается и сжатый воздух, надувая резиновое кольцо, уменьшает отверстие насадки. При увеличении вакуума происходит обрат-

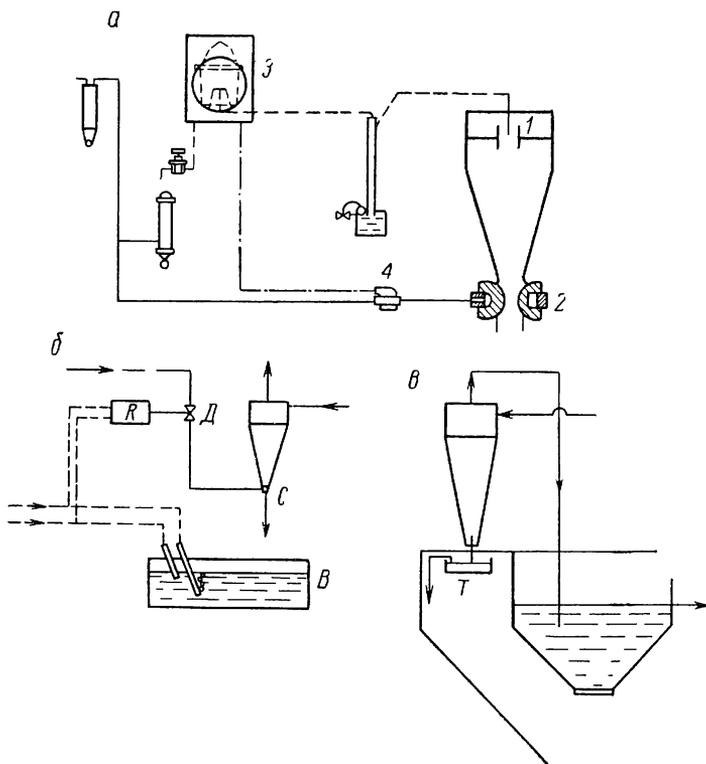


Рис. 58. Схемы автоматической регулировки работы гидроциклонов: а — регулировка с помощью контрольной трубки; б — регулировка с помощью разницы гидростатического давления; в — тарельчатая регулировка

ное явление. Таким образом поддерживается постоянный вакуум, при котором получается требуемое качество продуктов, разгружаемых через насадку и сливное отверстие.

На практике наиболее часто применяется способ регулировки с помощью резинового кольца и разницы гидростатического давления (рис. 58, б).

В емкость, предназначенную для разгружаемого через насадку продукта (или части его) погружены две трубки, концы которых находятся на различной высоте. По этим трубкам под небольшим давлением проходит воздух, который в виде пузырьков выходит через слой материала. Разница давления воздуха в трубках является

функцией плотности продукта, находящегося в сосуде B . Чем выше плотность, тем больше разница давления в трубках. Эта разница фиксируется регулятором R , который при уменьшении плотности продукта открывает вентиль D сжатого воздуха, вследствие чего резиновое кольцо надувается и происходит уменьшение отверстия насадки C . При повышенной плотности материала в сосуде B происходит уменьшение количества сжатого воздуха, подаваемого в резиновое кольцо, в результате чего отверстие насадки расширяется.

Недостатком этих способов регулировки является большой и неравномерный износ резиновых колец. Если несколько гидроциклонов или батарея их обслуживается одним общим регулятором (что часто бывает на практике), то при повреждении одного резинового кольца, как правило, надо заменять кольца всех циклонов, так как точная регулировка может осуществляться лишь при одинаковом износе всех резиновых колец. Этот недостаток устраняется применением тарельчатого регулятора (рис. 58, e). В данном случае концы разгрузочных патрубков как для верхнего, так и для нижнего продуктов выведены в жидкостные затворы. Ниже конца патрубка для разгрузки сгущенного продукта расположен металлический диск T с небольшим бортиком. Этот диск можно перемещать вверх или вниз в известных пределах. Вместо резинового кольца в отверстие насадки вставляется патрубок из твердого материала, устойчивого против истирания, лучше всего из стекла. Продукт, разгружаемый через стеклянный патрубок, поступает на диск и, переливаясь через его борт, попадает в сосуд, куда собираются аналогичные продукты всех гидроциклонов, обслуживаемых одним общим регулятором.

Вакуум в воздушном столбе колеблется от очень малых значений до 1000 мм вод. ст. и больше в зависимости от плотности продукта, разгружаемого через насадку.

С повышением плотности среды в гидроциклоне увеличивается количество верхнего продукта разделения. Этим усиливается всасывающее действие потока жидкости, вытекающей через сливное отверстие, и увеличивается вакуум в воздушном столбе. Измерения Козина и Ходека показали, что вакуум, при прочих равных условиях, с погружением свободных концов разгрузочных патрубков гидроциклона в жидкость повышается в 2—2,5 раза. При этом образуется замкнутая система, и колебание плотности одного из продуктов разделения вызывает изменение вакуума в воздушном столбе.

Погружение концов разгрузочных патрубков в суспензию соответствующей плотности обеспечивает требуемое изменение вакуума в гидроциклоне и позволяет автоматически регулировать процесс разделения.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИДРОЦИКЛОНОВ

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГИДРОЦИКЛОНА

Технологический расчет гидроциклона сводится к определению производительности, плотности или крупности разделения.

При расчете определяются также выхода нижнего и верхнего продуктов, степень сгущения или осветления и содержание твердого в сгущенном продукте и в сливе, а также эффективность обогащения или классификации. Сложность гидродинамических условий в гидроциклоне, недостаточная изученность явлений, происходящих в нем, и отсутствие достаточно точных зависимостей между основными переменными факторами работы затрудняют технологический расчет гидроциклона. Имеющиеся представления о характере движения среды, накопленный экспериментальный материал о влиянии основных переменных факторов на процесс разделения позволяют сделать приближенный расчет производительности, крупности разделения и технологических показателей работы гидроциклона.

Определение производительности

Производительность гидроциклона зависит от ряда переменных величин, основными из которых являются: давление на входе, размеры входного отверстия, угол конусности и размеры разгрузочного и сливного отверстий. Она зависит также от характера обрабатываемого материала.

По данным Келсалла, производительность гидроциклона и давление на входе H находятся в следующей зависимости:

$$Q = H^{0,468}.$$

Борисов и Ангелов [26] получили такую же зависимость ($Q = H^{0,467}$). Дальстром, Травинский и Поваров приводят зависимость

$$Q = H^{0,5}.$$

Исследования автора подтвердили, что практически между производительностью гидроциклона и давлением на входе справедливой является зависимость

$$Q = H^{0,5}$$

или

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}$$

При постоянном давлении на входе количество пульпы, проходящей через гидроциклон, возрастает с увеличением размера входного отверстия. Однако линейной зависимости между площадью отверстия

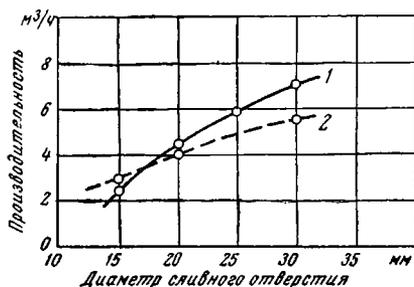


Рис. 59. Зависимость между производительностью и диаметром сливного отверстия d_u гидроциклона при различных диаметрах разгрузочного отверстия d_u :

1 — $d_u = 8$ мм; 2 — $d_u = 10$ мм

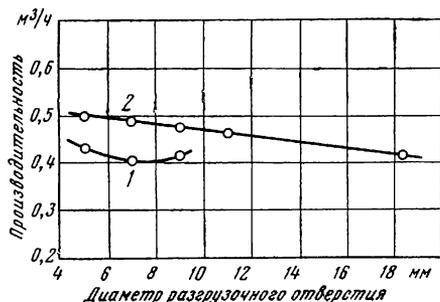


Рис. 60. Зависимость между производительностью и диаметром разгрузочного отверстия гидроциклона при различных диаметрах сливного отверстия d_o :

1 — $d_o = 10$ мм; 2 — $d_o = 15$ мм

питания и производительностью гидроциклона не наблюдается, так как на характер этой зависимости существенное влияние оказывают также размеры разгрузочного и сливного отверстий, угол конусности, диаметр циклона и другие параметры.

Уменьшение размеров разгрузочного и сливного отверстий вызывает повышение сопротивления потоку жидкости, вследствие чего падает производительность гидроциклона.

На рис. 59 показана зависимость между производительностью гидроциклона и диаметром сливного отверстия. Вследствие того, что основная масса жидкости удаляется из гидроциклона через сливное отверстие, изменение диаметра разгрузочного отверстия в оптимальных пределах оказывает незначительное влияние на производительность аппарата (рис. 60).

Производительность находится в зависимости также от диаметра, длины и угла конусности гидроциклона. Изменение этих параметров приводит к уменьшению или увеличению емкости аппарата и сопротивления движущемуся потоку. Дальстром отмечает, что от уменьшения угла конусности повышается значение коэффициента производительности. К такому же выводу пришли А. И. Поваров, Ван-дер-Вальт и другие исследователи.

При увеличении высоты цилиндрической части циклона незначительно повышается его производительность. По данным Модера и Дальстрема, диаметр гидроциклона D связан с диаметром входного отверстия d_e и сливного d_0 следующей зависимостью:

$$2d_e + d_0 \cong 0,5D. \quad (59)$$

При этом отношение диаметра $\frac{d_0}{d_e} = 2$.

По другим данным,

$$d_e = \frac{D}{3,5} \div \frac{D}{7};$$

$$d_0 = \frac{D}{2} \div \frac{D}{4}.$$

Производительность гидроциклона обычно определяется:

1) при рассмотрении его как местного сопротивления на трубопроводе;

2) исходя из общей формулы истечения жидкости из затопленного отверстия;

3) на основе формулы истечения через водослив, образованный краями сливного отверстия.

Исходя из общей формулы истечения жидкости из затопленного отверстия А. И. Поваров вывел следующее уравнение:

$$Q = \frac{\pi D_e^2}{4} \mu' \sqrt{2g(H - \Delta H)}$$

и, вводя в него диаметры гидроциклона и верхнего сливного отверстия, получил полуэмпирическую формулу

$$Q = \frac{V\sqrt{2}}{4} \pi \mu' \frac{d_e^2}{D d_0} \sqrt{1 - \frac{\Delta H}{H}} D d_0 \sqrt{2gH}, \quad (60)$$

где Q — расход пульпы через питающее отверстие, или полная объемная производительность гидроциклона, $см^3/сек$;

μ — коэффициент расхода;

d_e — диаметр питающего отверстия, $см$;

d_0 — диаметр верхнего сливного отверстия, $см$;

D — диаметр гидроциклона, $см$;

H — напор питания в питающем патрубке, $см вод. ст.$;

ΔH — напор в гидроциклоне, $см вод. ст.$;

g — ускорение силы тяжести, $см/сек^2$.

Выражение, представляющее собой безразмерный коэффициент, заменим k , тогда получим формулу

$$Q = kD d_0 \sqrt{gH}. \quad (61)$$

В этой формуле значение коэффициента производительности k не зависит от размера гидроциклона, диаметров сливного или раз-

грузочного отверстий, а также давления на входе и зависит, главным образом, от относительной величины входного отверстия.

По опытным данным А. И. Поварова, для гидроциклонов диаметром от 125 до 600 мм с углом конусности $\alpha = 38^\circ$ величина $k = 0,524$, если D и d_0 в см и H в кг/см². С уменьшением угла α величина k возрастает. Величина k для гидроциклонов конструкции Механобра определяется по кривым, показанным на рис. 61. Коэффициент k изменяется в зависимости от отношения диаметров входного отверстия и гидроциклона (кривая 1). Характер изменения k близок к линейному (кривая 2).

Рассматривая гидроциклон как местное сопротивление на трубопроводе и определяя потери напора по обычной формуле гидравлики, Циперович и Долинский предложили следующую формулу производительности гидроциклона:

$$Q = kF_e \frac{r_0}{R} \sqrt{2gH}, \quad (62)$$

где k — коэффициент производительности;
 F_e — площадь питающего отверстия;
 r_0 — радиус верхнего сливного отверстия;
 R — средний радиус гидроциклона;
 H — напор питания.

Рассуждая аналогичным образом, Модер и Дальстром получили следующую формулу:

$$Q = k(d_e d_0)^{0,9} \sqrt{\Delta H}, \quad (63)$$

где Q — производительность гидроциклона, л/мин;
 k — коэффициент производительности, зависящей, главным образом, от формы циклона и отношения диаметров верхнего и нижнего разгрузочных отверстий;
 d_e и d_0 — соответственно диаметры питающего и сливного отверстий, см;
 ΔH — перепад давлений между питающим и сливным отверстием, м вод. ст.

Для гидроциклона с углом $\alpha = 15^\circ$ и высотой цилиндрической части, равной двум диаметрам ее, величина коэффициента k определяется по формулам:

d_0/d_e	k
0,75 ÷ 1,00	$6,2e^{0,00537\gamma}$
1,25 ÷ 1,35	$7,16e^{0,00234\gamma}$
1,68 ÷ 2,11	$6,85e^{0,00163\gamma}$

где γ — выход нижнего продукта, % (по объему);
 e — основание натуральных логарифмов.

Тужон отмечает, что почти все наблюдения и замеры подтверждают правильность формулы (63).

Приведенные формулы идентичны и выражают производительность гидроциклона как функцию давления на входе, диаметра циклона, диаметров входного и сливного отверстий. При помощи коэффициента производительности k учитывается влияние конструктивных особенностей гидроциклона и других переменных факторов. Однако громоздкость этих формул и трудность определения величины коэффициента производительности не позволяют широко использовать их.

Для практических расчетов удобнее пользоваться упрощенной формулой производительности, которую можно вывести при помощи уравнения Бернулли.

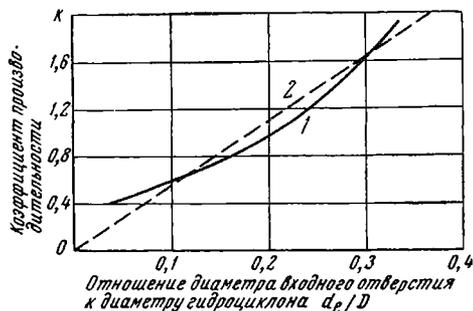


Рис. 61. Изменение значения коэффициента производительности k в зависимости от величины входного отверстия гидроциклона

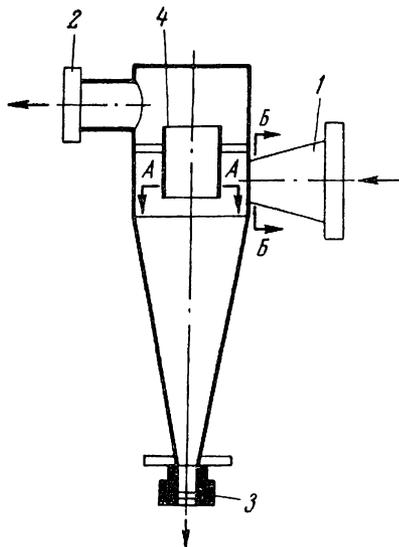


Рис. 62. Гидроциклон конический (разрез):

1 — входной патрубок; 2 — отводной патрубок; 3 — разгрузочная насадка; 4 — сливная трубка

Составим уравнение Бернулли для сечений А — А и Б — Б гидроциклона, представляющих собой соответственно площади сливного и входного отверстий (рис. 62). При этом условно принимаем, что через разгрузочное отверстие выходит незначительное количество жидкости:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g},$$

откуда

$$\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g},$$

но

$$\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = \Delta H;$$

следовательно,

$$\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} = \Delta H$$

или

$$v_1^2 - v_2^2 = 2g \Delta H. \quad (64)$$

С другой стороны, из закона неразрывности имеем

$$v_2 = \frac{v_1 F_1}{F_2}. \quad (65)$$

Решив уравнения (64) и (65), получим

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g \Delta H}{1 - \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2}},$$

тогда пропускная способность гидроциклона будет

$$Q = k_1 F_1 \sqrt{\frac{2g \Delta H}{1 - \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2}}, \quad (66)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей в сечении и неизбежные потери напора в гидроциклоне;

F_1, F_2 — соответственно площади входного и сливного отверстий.

Аналогичной является формула производительности, предложенная Геркенгофом,

$$Q = kF \sqrt{2gH}.$$

Для определения значения коэффициента k Геркенгоф рекомендует формулу

$$k = \frac{d_0^2}{D^2 - d_0^2}.$$

Частон предлагает аналогичную формулу для приближенного расчета производительности гидроциклона

$$Q = 23,6F \sqrt{p}, \quad (67)$$

где Q — объемная производительность, л/мин;

F — площадь питающего отверстия, см²;

p — давление питания, кг/см².

Подсчеты показывают, что в большинстве случаев фактическая производительность гидроциклона отклоняется от расчетной по формуле (67) на $\pm 20\%$.

Определение крупности разделения

При классификации материала в гидроциклоне основным параметром является размер граничных зерен. Крупность этих частиц можно определить исходя из условий равновесия сил, действующих на частицу. Если рассматривать частицу, находящуюся в гидроциклоне, под действием двух основных сил (центробежной C и сопротивления жидкости S), то можно полагать, что все зерна размером больше граничного будут отброшены центробежной силой на периферию и попадут в нижний продукт, а частицы меньшего размера будут унесены радиальным потоком жидкости в осевую зону и перейдут в слив. Силы C и S , действующие на частицу граничной крупности, уравниваются, и последняя продолжительное время будет циркулировать в гидроциклоне при определенном радиусе вращения. Зная величину скоростей v_t и u на данном радиусе, можно расчетным путем определить крупность граничного зерна.

При рассмотрении равновесного состояния частицы в пределах действия закона Стокса принимается, что центробежная сила C равна сопротивлению вязкости S , т. е.

$$\frac{\pi d^3 (\rho - \rho_0) v_t^2}{6gr} = 3\mu du,$$

откуда

$$d = \sqrt{\frac{48\mu g}{\rho - \rho_0} \frac{Vru}{v_t}}, \quad (68)$$

где μ — вязкость среды;

g — ускорение силы тяжести;

ρ — плотность частицы;

ρ_0 — плотность среды;

r — радиус вращения равноразделяемых частиц;

u и v_t — соответственно радиальная и тангенциальная скорости частицы на радиусе r .

Для определения диаметра граничного зерна по формуле (68) необходимо знать величину скоростей v_t и u и радиус r .

Принимая, что движение зерен в центральном восходящем потоке под действием центробежной силы происходит только в радиальном направлении, А. И. Поваров предложил следующую формулу для определения максимальной крупности частиц, уходящих в слив:

$$d = 0,75 \frac{d_e^2}{\varphi_x} \sqrt{\frac{\pi\mu}{Qh_1(\rho - \rho_0)}}, \quad (69)$$

где d — эквивалентный диаметр граничного зерна, см;

d_e — диаметр питающего отверстия, см;

φ_x — коэффициент изменения окружной скорости, представляющей собой отношение скорости жидкости на расстоянии от оси гидроциклона, равном радиусу сливного отверстия, к скорости жидкости в точке питания;

Q — производительность гидроциклона по сливу, $см^3/сек$;
 h — высота центрального потока, равная приблизительно высоте циклона за вычетом $1/3$ высоты его конической части, $см$.

Величина коэффициента φ_x для гидроциклона данной конструкции изменяется в зависимости от диаметров гидроциклона D и сливной трубки d_0 , с которыми он связан выражением

$$\varphi_x \frac{d_0}{D} = \text{const.} \quad (70)$$

Коэффициент φ_x изменяется также в зависимости от размера входного отверстия, угла конусности и от других факторов. Для гидроциклона с углом $\alpha = 38^\circ$

$$\varphi_x \frac{d_0}{D} = 0,103.$$

Формула А. И. Поварова применима для определения минимальной крупности граничного зерна в случае разделения в очень разбавленных пульпах. Она не учитывает плотности и крупности материала в исходном продукте. При слишком малом диаметре разгрузочного отверстия фактическая крупность граничных зерен будет больше, чем рассчитанная по формуле (68).

Следует иметь в виду, что крупность граничного зерна всегда будет несколько меньше верхней крупности зерна сливного продукта. Отмечается [2, 8], что формула (68) применима при критерии Рейнольдса (для зерна) $Re_z \leq 1$, причем

$$Re_z = \frac{\rho v_0}{\nu},$$

где v_0 — скорость осаждения зерна;
 ν — кинематическая вязкость жидкости.

Для определения максимальной крупности зерен в сливе при классификации в гидроциклоне Тарьян [43] предложил формулу, которая имеет следующий вид:

$$d = \frac{80 d_0^2}{\sqrt{(\rho - \rho_0) Q h}} \left(\frac{d_0}{D} \right)^n, \quad (71)$$

где Q — производительность гидроциклона по исходному продукту, $м^3/ч$;

h — высота центрального восходящего потока жидкости (приблизительно равна от $1/2$ до $2/3$ h_B), $см$.

Значения остальных величин даны выше. Тарьян принимает значение показателя степени $n = 0,8$.

В литературе рекомендуется ряд формул для определения диаметра граничного зерна при классификации в гидроциклоне. Можно привести формулы:

Травинского

$$d \approx \sqrt{\frac{\mu D}{(\rho - \rho_0) n_w}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta p}}; \quad (72)$$

$$d = \frac{13,8 (d_e d_0)^{0,68}}{\sqrt{(\rho - \rho_0) v_0^{0,53}}}, \quad (73)$$

где μ — вязкость суспензии;

D — диаметр гидроциклона;

n_w — число оборотов жидкости у стенки гидроциклона;

Δp — перепад давления в гидроциклоне;

d_e, d_0 — соответственно диаметры питающего и сливного отверстий;

v_0 — скорость жидкости у входа в циклон.

Отмечается, что хорошие результаты, совпадающие с опытными данными, получаются при расчете по формуле Тарьяна (71) при $n = 0,64$.

2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ГИДРОЦИКЛОНА

К основным размерам гидроциклона относятся: диаметры гидроциклона, входного, сливного и разгрузочного отверстий. Высота цилиндрической части и угол конусности гидроциклона принимаются обычно по конструктивным соображениям и в зависимости от назначения гидроциклона.

Определение диаметров гидроциклона и входного отверстия

Необходимое количество гидроциклонов для заданной производительности, диаметр гидроциклона, а также размеры входного отверстия можно рассчитать исходя из формул для определения производительности. Для этого используем формулу

$$Q = 23,6F \sqrt{p}.$$

Отсюда находим

$$F = \frac{Q}{23,6 \sqrt{p}}.$$

Если входное отверстие гидроциклона круглое или если принять его условно за круглое, то диаметр его будет

$$d_e = 0,23 \sqrt[4]{\frac{Q^2}{p}}. \quad (74)$$

Диаметр гидроциклона принимается равным шести; восьмикратному размеру диаметра входного отверстия, т. е. $D = (6 \div 8) d_e$.

Если при этом гидроциклон получается очень большим и возникает необходимость заменить его несколькими гидроциклонами меньшего диаметра, то можно исходить из следующего:

$$F = \frac{\pi \left(\frac{d_e}{m} \right)^2}{4} n, \quad (75)$$

или

$$F = \frac{\pi d_e^2}{4} \frac{n}{m^2},$$

откуда

$$\begin{aligned} \frac{n}{m^2} &= 1; \\ m &= \sqrt{n}, \end{aligned} \quad (76)$$

где m — отношение диаметров большого и малого гидроциклонов;
 n — число малых гидроциклонов.

Задавшись числом гидроциклонов n , определяем m и находим диаметр входного отверстия d_B и диаметр гидроциклона D_{Γ} :

$$d_B = \frac{d_e}{m}, \quad (77)$$

$$D_{\Gamma} = (6 \div 8) d_B. \quad (78)$$

Определение диаметров сливного и разгрузочного отверстий

Диаметры сливного и разгрузочного отверстий, а также их соотношение обуславливаются качественной характеристикой обрабатываемого материала и условиями, в которых происходит процесс разделения.

Из уравнения (58) находим отношение скоростей движения зерна:

$$\frac{u}{v} = k_1 \sqrt{\frac{2d(\rho - \rho_0)}{r\rho_0}}. \quad (79)$$

При прочих равных условиях, отношение $\frac{u}{v}$ в гидроциклоне определяется размерами сливного и разгрузочного отверстий.

Характер изменения тангенциальной скорости вдоль радиуса гидроциклона зависит главным образом от размера отверстия сливной трубки. При относительно больших диаметрах сливной трубки тангенциальная скорость от максимальной величины в области, прилегающей к стенке гидроциклона, уменьшается с уменьшением радиуса, достигая максимальной величины у границ воздушного столба (табл. 27).

Характер изменения тангенциальной скорости в зависимости от диаметра сливной трубки на горизонтальных уровнях различен, однако в верхних и средних зонах гидроциклона, где происходит в основном процесс разделения зерен по крупности и плотности, величина тангенциальной скорости находится в прямой зависимости от диаметра сливной трубки.

**Изменение величины тангенциальной скорости в зависимости
от диаметра сливного патрубка, м/сек**

Зоны замера	Диаметр сливного патрубка					Постоянные условия опытов
	10	15	25	35	48	
Цилиндрическая часть	3,8	4,7	5,3	5,7	6,3	Диаметр гидроциклона 80 мм, давление 1,2 атм, угол конусности 20°, диаметр разгрузочной насадки 10 мм
На стыке цилиндрической и конической частей	4,1	5,1	5,2	5,4	6,2	
Верхняя зона конической части . . .	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	
Средняя зона конической части . . .	4,0	4,7	5,1	4,7	4,9	
Нижняя зона конической части . . .	5,5	4,6	6,0	4,5	4,0	

Измерения показали, что величина тангенциальной скорости возрастает от увеличения отношения диаметров сливного d_0 и разгрузочного d_u отверстий, т. е.

$$v = k \frac{d_0}{d_u}. \quad (80)$$

Всякое изменение тангенциальной скорости увеличивает или уменьшает величину радиальной скорости. Для гидроциклона существует следующая зависимость между этими составляющими скорости:

$$u = k_2 v^n, \quad (81)$$

где $n > 1$.

Эта зависимость показывает, что при возрастании тангенциальной скорости отношение $\frac{u}{v}$ уменьшается. Из уравнений (80) и (81) получим (приняв $n = 2$)

$$\frac{u}{v} = k_3 \frac{d_0}{d_u}.$$

Подставив значение u/v из уравнения (79) и заменив k_3 на $1/k$, получим

$$\frac{d_0}{d_u} = k \sqrt{\frac{2d(\rho - \rho_0)}{r\rho_0}}, \quad (82)$$

где d_0 и d_u — соответственно диаметры сливной трубки и разгрузочной насадки;

k — коэффициент, зависящий от давления, диаметра гидроциклона, высоты его цилиндрической части, угла конусности, а также характера обрабатываемого материала;

- d — крупность граничного зерна, по которому происходит разделение. При обогащении принимается, что d — размер наибольшего зерна в питании, *см*;
- ρ — плотность разделения, при классификации — плотность материала, поступающего в гидроциклон, *г/см³*;
- ρ_0 — плотность среды, *г/см³*;
- r — радиус вращения граничного зерна, принимается на 1—2 *см* меньше радиуса гидроциклона, *см*.

Значение коэффициента k обычно определяется опытным путем, но оно может быть приближенно найдено по следующей формуле:

$$k = 10 \sqrt{\frac{2 + \operatorname{ctg} \alpha}{p}}, \quad (83)$$

где p — давление, питание, *кг/см²*;

α — половина угла конусности гидроциклона, *град*.

При расчете гидроциклона для обработки очень мелкого материала (ниже 0,1 *мм*) или для классификации материала по граничному зерну размером 0,1 *мм* и ниже значение коэффициента k , найденное по формуле (83), следует увеличить в 1,5—2 раза. Для

Таблица 28

Сравнительные значения отношений диаметров
сливного и разгрузочного отверстий

Промышленные установки с гидроциклонами диаметром 76, 254, 350, 508 и 610 мм для классификации и обесшламливания руд и углей		Полупромышленные установки с гидроциклонами диаметром 100, 300 и 400 мм по обогащению угля		Лабораторные исследования по обогащению угля на гидроциклоне диаметром 76 мм	
фактическое	расчетное	фактическое	расчетное	фактическое	расчетное
4,5	3,7	3,5	3,6	4,5	4,1
1,5	1,7	2,4	2,1	3,2	2,8
1,1	1,2	2,5	2,7	3,8	3,5
2,2	2,1	2,5	2,6	2,8	3,1
3,4	3,8	3,2	3,4	2,9	2,9
2,0	2,4	5,0	4,6	5,6	5,5
3,2	2,2	2,0	2,4	4,0	4,5
2,0	2,4	2,4	2,1	2,8	3,1
2,0	2,5	—	—	4,7	5,4
6,4	2,0	—	—	3,4	3,8
2,7	3,2	—	—	4,8	5,6
1,2	4,1	—	—	3,6	4,4
2,0	1,8	—	—	3,1	3,6
2,0	2,5	—	—	—	—
2,0	0,8	—	—	—	—
2,3	1,8	—	—	—	—
1,9	1,9	—	—	—	—
6,9	1,8	—	—	—	—
3,0	2,8	—	—	—	—

наклонного гидроциклона значение коэффициента k уменьшается в 1,2—1,3 раза.

Определив отношение d_0/d_u по формуле (82), задаются диаметром разгрузочного отверстия d_u и находят диаметр сливного отверстия d_0 . При этом необходимо иметь в виду, что d_u не должен быть меньше трехкратного размера наибольшего зерна обрабатываемого материала. Угол α , высота цилиндрической части гидроциклона и угол наклона подбираются опытным путем. При этом учитывается, что с увеличением высоты цилиндрической части гидроциклона или уменьшением угла α снижается крупность граничного зерна при классификации или плотность разделения при обогащении. С изменением этих параметров увеличивается время пребывания обрабатываемого материала в аппарате и процесс разделения протекает более эффективно, однако при этом увеличивается износ гидроциклона.

Установка гидроциклона в наклонном положении позволяет использовать разгрузочные насадки с большим диаметром, что устраняет возможность забивания разгрузочного отверстия.

В табл. 28 приведены величины отношений диаметров сливного и разгрузочного отверстий.

ОБОГАЩЕНИЕ УГЛЕЙ В ГИДРОЦИКЛОНАХ

1. ОБОГАЩЕНИЕ В ТЯЖЕЛЫХ СУСПЕНЗИЯХ

При обогащении мелкого угля гравитационными методами применяются отсадочные машины, концентрационные столы и желобные мойки. Однако все эти машины и аппараты при обогащении материала мельче 6 мм могут обеспечить удовлетворительные технологические результаты только в том случае, если уголь сравнительно легкообогатим (т. е. если выход смежных фракций, плотность которых отклоняется на $\pm 0,1$ от плотности разделения, не превышает 15%).

В последнее время большое внимание уделяется вопросу обогащения углей в тяжелых суспензиях.

Высокая четкость разделения при обогащении углей в тяжелых суспензиях является серьезным основанием для дальнейшего развития и внедрения этого метода в промышленность.

Современные устройства дают возможность обогащать в тяжелых суспензиях весьма крупный уголь. В ФРГ работают установки для обогащения угля с верхним пределом крупности 200 мм.

В тяжелых минеральных суспензиях обогащается также и мелкий уголь. В настоящее время имеется немало установок для этой цели. Во многих странах, в частности в ФРГ и Бельгии, в тяжелых суспензиях перерабатывается продукт мелких классов, полученный с отсадочных машин и установок пневматического обогащения. Обогащение промпродукта в тяжелых суспензиях более экономично, так как при этом нет необходимости в тщательной дешламации и значительно меньшее количество продукта поступает в сепаратор с тяжелой суспензией.

Нижний предел крупности при обогащении углей в тяжелых суспензиях еще точно не определен, тем не менее считается установленным, что с уменьшением крупности ухудшается четкость разделения. Перед обогащением в тяжелых суспензиях мелкий уголь подвергается дешламации, которая, как правило, производится на грохотах с отверстиями сит 0,5 или 1 мм. Однако в обычных сепараторах с применением тяжелых суспензий обогащаются, как правило, угли крупностью выше 3 мм.

Известно, что эффективность обогащения гравитационными методами повышается с увеличением разности скоростей падения разделяемых зерен. Скорость падения мелкого материала зависит не только от размера зерна и его плотности, но также и от вязкости и плотности среды, в которой происходит разделение. С уменьшением размеров зерен снижается разность скоростей их падения и значительно возрастает время, необходимое для разделения.

Для более быстрого разделения мелких частиц угля и породы в суспензии необходимо увеличить разность их скоростей. В поле центробежной силы (в частности, в гидроциклоне) время разделения частиц угля и породы резко сокращается, а эффективность процесса повышается.

Применение гидроциклонов для обогащения угля в тяжелых суспензиях по сравнению с применяющимися в настоящее время конусными, корытными и барабанными сепараторами, а также сепараторами с вертикально-восходящим потоком имеет то преимущество, что вследствие большой скорости движения среды резко уменьшается структурирование суспензии, которое ведет к повышению ее вязкости.

Большая центробежная сила в гидроциклоне уменьшает влияние вязкости суспензии на результаты разделения.

Концентрация суспензоида не одинакова в различных точках внутри гидроциклона. Она изменяется в зависимости от соотношения действующих сил. Эффективная плотность суспензии, соответствующая плотности разделения в зоне, где происходит в основном процесс обогащения, во всех случаях больше плотности суспензии, загружаемой в гидроциклон.

В Голландии в гидроциклонах обогащается труднообогатимый уголь крупностью 9 мм. Из угля зольностью 29,1% получаются концентрат зольностью менее 4% (при выходе 40%) и хвосты зольностью 69—70% (выход 60%). Обогащение происходит при плотности разделения 1,52 г/см³ и плотности суспензии 1,41 г/см³. В концентрате содержится незначительное количество фракций плотностью более 1,5 г/см³. Наибольшее количество этих фракций имеется в классе 4—9 мм. Оно уменьшается в средних классах и несколько повышается в мелких. Лучше обогащается класс 2—4 мм.

В Чехословакии в гидроциклонах обогащаются бурые угли.

Установлена возможность применения в качестве суспензоида измельченной породы, содержащейся в угле. Несмотря на то, что порода в бурых углях Чехословакии имеет исключительно глинистый характер (что способствует повышению вязкости среды), при испытаниях в полупромышленных условиях получены удовлетворительные результаты обогащения.

В настоящее время гидроциклоны внедряются также на наших углеобогатительных фабриках.

Гидроциклоны, применяющиеся для обогащения мелкого угля в тяжелых суспензиях, работают при высоких (более 1 *ати*), средних (до 0,5 *ати*) и низких (около 0,1 *ати*) давлениях. В настоящее время в гидроциклонах, установленных в наклонном положении (под углом

около 15°), чаще применяется среднее давление. В ФРГ для обогащения угля применяются гидроциклоны только среднего давления, так как это позволяет исключить из схемы цепи аппаратов перекачивающие насосы и уменьшить износ деталей гидроциклона.

В качестве утяжелителей для приготовления суспензии используются различные минералы, а также отходы некоторых производств. Для обогащения угля требуется суспензия относительно небольшой плотности (от 1,2 до 2,0 г/см³). Для приготовления такой суспензии применяются: барит, гематит, магнетит, пирит, ферросилиций, пирролизит, лёсс, пиритные огарки, колошниковая пыль и угольная порода.

Имеются сведения, что при обогащении угля в гидроциклоне особенно хорошие результаты получаются при использовании магнетитовой тяжелой суспензии. Одним из основных свойств суспензии является ее устойчивость, т. е. способность сохранять частицы утяжелителя во взвешенном состоянии, а это возможно, если они обладают очень малой скоростью осаждения. Так как скорость падения частиц зависит от их крупности, плотности, а также от вязкости среды и степени концентрации утяжелителя, то чем меньше размер частиц утяжелителя и их плотность, тем более устойчивой должна быть суспензия.

Устойчивость суспензии определяется по скорости изменения плотности или по скорости осаждения твердых частиц.

В обоих случаях устойчивость суспензии θ является обратной функцией скорости образования осадка или скорости v осветления суспензии:

$$\theta = \frac{1}{v}.$$

С повышением плотности суспензии устойчивость ее возрастает по закону степенной функции:

$$\theta = \theta_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n, \quad (84)$$

где θ_0 — устойчивость суспензии плотности ρ_0 ;

n — постоянный показатель для данной суспензии (для суспензии из свинцового блеска $n = 5,92 \div 8,02$);

ρ — плотность суспензии в рассматриваемый момент;

ρ_0 — начальная плотность суспензии.

Для того чтобы получить достаточно устойчивую суспензию в состоянии покоя, необходимо измельчить утяжелитель до размеров коллоидных частиц, т. е. до 0,001 мм. Но так как измельчение до такой крупности является трудоемким и дорогим процессом, а регенерация очень тонко измельченного утяжелителя весьма затруднительна, то на практике ограничиваются измельчением до 0,1—0,15 мм, а устойчивости суспензии поддерживается механическим перемешиванием ее.

При обогащении углей чаще всего в качестве утяжелителя применяется магнетит, измельченный в шаровой мельнице, работающей в замкнутом цикле с механическим классификатором или классифицирующим гидроциклоном. Гранулометрическая характеристика такого магнетита приведена в табл. 29.

Таблица 29

Гранулометрическая характеристика
измельченного магнетита

Крупность, мм	Выход, %	
	от операции	суммарный
—0,105	0,1	0,1
0,074—0,105	0,5	0,6
0,050—0,074	1,5	2,1
0,030—0,050	33,4	35,5
0,012—0,030	33,3	68,8
0,005—0,012	17,5	86,3
0—0,005	13,7	100,0

Из таблицы видно, что основная часть магнетита представлена зернами крупностью 0,012—0,05 мм.

При обогащении в гидроциклоне с применением тяжелых суспензий часть утяжелителя уходит вместе с продуктами обогащения, повышая тем самым зольность угольного концентрата. Поэтому утяжелитель, как правило, извлекается из продуктов обогащения для повторного использования. Отделение утяжелителя от продуктов обогащения в основном производится на обезвоживающих грохотах. Так как практически невозможно использовать сита с размером отверстий менее 0,2—0,3 мм, то с утяжелителем уходит значительная часть угольной и породной мелочи. В результате этого повышается вязкость суспензии и ухудшается процесс обогащения.

Существующие способы извлечения утяжелителя из продуктов обогащения основаны на различии физико-химических, магнитных и других свойств утяжелителя и обогащаемого материала.

Утяжелители, употребляемые в практике обогащения углей, могут быть немагнитными (барит, кварц, сланец, песок) и магнитными (магнетит, ферросилиций и др.).

Из немагнитной суспензии угольные частицы удаляются флотацией, а из магнетитовой или ферросилициевой — магнитной сепарацией.

Для улучшения процессов регенерации суспензии необходимо производить предварительную дешламацию обогащаемого угля с целью удаления тонких частиц (обычно мельче 0,5 мм). Это целесообразно производить даже при наличии небольшого количества тонких шламов в угле.

Наиболее дешевым процессом регенерации магнетитовой суспензии является магнитная сепарация. Этим во многом объясняется

широкое применение магнетита и других магнитных минералов в качестве утяжелителя.

Потери магнетита с немагнитными фракциями магнитных сепараторов составляют менее $0,05 \text{ кг/т}$, а потери его со сливом сгустителя — ничтожно малую величину. В среднем общие потери магнетита составляют около $0,55 \text{ кг/т}$ исходного угля.

Крупность утяжелителя суспензии

На мойках, оборудованных установками для обогащения углей в тяжелых суспензиях, в качестве суспензоида преимущественно используется измельченный магнетит.

Оптимальная крупность магнетита для приготовления тяжелой суспензии зависит от многочисленных факторов, в особенности от типа аппарата, в котором происходит обогащение угля. При обогащении в лотковых сепараторах, где пульпа находится почти в спокойном состоянии, используется магнетит с содержанием до 95% частиц крупностью $-0,06 \text{ мм}$. При обогащении в сепараторах, где имеют место горизонтальный или горизонтальный и восходящий потоки (барабанные сепараторы, сепараторы Нельсон-Девис, Дрюбой), применяется более крупный магнетит (80% частиц крупностью $-0,06 \text{ мм}$) [25].

Во Франции применяется два сорта магнетита по крупности. В первом сорте содержится 60—70% частиц $-0,04 \text{ мм}$ и не более 5% частиц $+0,15 \text{ мм}$, а во втором сорте 50% частиц $-0,04 \text{ мм}$ и не более 10% частиц $+0,15 \text{ мм}$.

При обогащении угля в сепараторах с нисходящим потоком применяется магнетит, содержащий до 30—40% частиц крупностью $-0,06 \text{ мм}$ и 20% — крупностью $+0,2 \text{ мм}$.

Применение более крупного магнетита для приготовления тяжелой суспензии имеет следующие преимущества: уменьшается вязкость суспензии, относительно быстро осаждаются крупные частицы под действием силы тяжести и лучше отделяются от примесей. Приготовление более крупного утяжелителя суспензии требует меньших затрат.

Основные потери утяжелителя при обогащении угля происходят с конечными продуктами обогащения вследствие недостаточного отделения суспензоида при промывке на грохотах. Степень отмывки продуктов обогащения от суспензии во многом зависит от режима работы грохота, в частности от толщины слоя материала на сите и от эффективности орошения водой. По результатам ряда работ, проведенных в ФРГ, можно видеть, что при нормальной эксплуатации грохотов с орошаемыми ситами для отмывки продуктов обогащения можно значительно снизить потери магнетита.

Потери магнетита при извлечении его из отработанной суспензии, по данным Кригсмана и Фонтейна [36], составляют всего 50 г/т . По другим данным, эти потери не превышают 20—25 г/т . При использовании более мелкого магнетита потери несколько повышаются.

Процесс обогащения проходит нормально в менее вязкой среде. Консистенция суспензии зависит от размера и формы частиц утяжелителя, в особенности от объема твердого материала, содержащегося в ней.

Основным требованием, предъявляемым к суспензии, является ее достаточная устойчивость, во многом зависящая от крупности утяжелителя. По данным Г. А. Музылева [25], с уменьшением крупности частиц суспензоида снижается агрегативная устойчивость суспензии, так как при определенной крупности начинается тепловое движение, увеличивающее вероятность столкновения и агрегации частиц. Известно, что свойство агрегативной устойчивости не может иметь большого значения для суспензий, применяющихся в практике обогащения в гидроциклоне, где среда находится в движении с большой скоростью и поэтому обладает относительно высокой динамической устойчивостью. В связи с этим при обогащении в гидроциклоне в принципе можно применять более крупные частицы утяжелителя для приготовления суспензии.

Важную роль при обогащении угля в гидроциклоне играет вязкость суспензии, в особенности при работе на средних и низких давлениях.

В случае вязкой среды центробежная сила оказывается недостаточной для того, чтобы тонкие частицы породы преодолевали сопротивление радиального потока жидкости и были отброшены на периферию, в результате чего ухудшается разделяемость таких частиц. Вязкость суспензии возрастает линейно с увеличением объемной концентрации твердых частиц, она повышается также в зависимости от крупности твердой фазы. Согласно выведенной Эйнштейном формуле для тонкодисперсной суспензии с малой объемной концентрацией твердого вязкость не зависит от размеров частиц утяжелителя. Эта формула имеет следующий вид:

$$\mu_c = \mu_0 (1 + 2,5C), \quad (85)$$

где μ_c — эффективная вязкость суспензии;

μ_0 — вязкость жидкой фазы;

C — объемная концентрация твердой фазы в суспензии.

Однако экспериментальные исследования показывают, что для так называемых грубодисперсных суспензий, которые применяются в технике обогащения полезных ископаемых, на эффективную вязкость влияют не только концентрация и форма взвешенных частиц, но и их размеры.

Экспериментальные исследования Шелтона и Де-Вани показали, что вязкость магнетитовой суспензии в значительной степени зависит от размеров частиц утяжелителя при плотности суспензии более $1,6 \text{ г/см}^3$. Исследования Г. А. Музылева [25], проведенные с суспензиями кварца различной дисперсности и суспензиями глины, подтвердили, что удельная поверхность утяжелителей, наряду с их объемной концентрацией, является решающим фактором, определяющим вязкость суспензий.

Г. А. Адамов и У. Ц. Андрес [1] установили, что вязкость магнетитовой суспензии, приготовленной из частиц размером — 0,056 мм, при объемной концентрации больше 0,09 соответствует плотности более 1,38 г/см³ и является функцией концентрации, а также степени дисперсности твердой фазы.

Исследованиями также показано, что образование структур в суспензиях происходит тем интенсивнее, чем меньше размеры частиц и чем больше объемная их концентрация.

При обогащении углей в гидроциклоне в тяжелых суспензиях утяжелитель обычно измельчается до 0,2; 0,15; 0,1 и 0,074 мм. Однако эти пределы крупности недостаточно обоснованы экспериментальными исследованиями.

Из опубликованных данных следует, что размер частиц суспензоида, так же как и плотность суспензии, должен быть подобран в зависимости от конструкции и размера гидроциклона.

Анализируя кинематику движения суспензии в гидроциклоне, Тарьян [43] расчетным путем определил, что для гидроциклона диаметром 200 мм (при диаметрах верхнего отверстия 80 мм, нижнего — 40 мм, отверстия питания 40 мм и высоте цилиндрической части 100 мм) наибольший размер частиц кварца в суспензии должен быть равен 0,063 мм. В случае уменьшения высоты цилиндрической части гидроциклона рекомендуется использовать более крупный суспензоид из кварца.

Влияние крупности утяжелителя суспензии на эффективность обогащения угля в гидроциклоне установлено автором экспериментально. В качестве утяжелителя был использован магнетит, в котором содержалось 68,25% Fe и 2,85% SiO₂.

Магнетит крупностью — 3 мм дробился на валковой дробилке примерно до 1 мм и затем измельчался в шаровой мельнице всухую. Для проведения опытов были приготовлены пробы магнетита крупностью — 0,2; — 0,15; — 0,1 и — 0,074 мм (табл. 30).

Таблица 30

Гранулометрическая характеристика магнетита, измельченного до различной крупности

Класс, мм	Крупность магнетита, мм			
	—0,2	—0,15	0,1	—0,074
	Выход, %			
0,15—0,2	28,1	—	—	—
0,1—0,15	17,1	21,1	—	—
0,074—0,1	7,4	11,7	11,2	—
—0,074	47,4	67,2	88,8	100,0
Итого	100,0	100,0	100,0	100,0

Содержание фракции $-0,074$ мм в пробах магнетита колебалось от 47 до 100%. При плотности $1,25$ г/см³ относительная вязкость суспензии, приготовленной из магнетита различной крупности, изменялась от 1,09 для крупности $-0,2$ мм до 1,20 для крупности $-0,074$ мм.

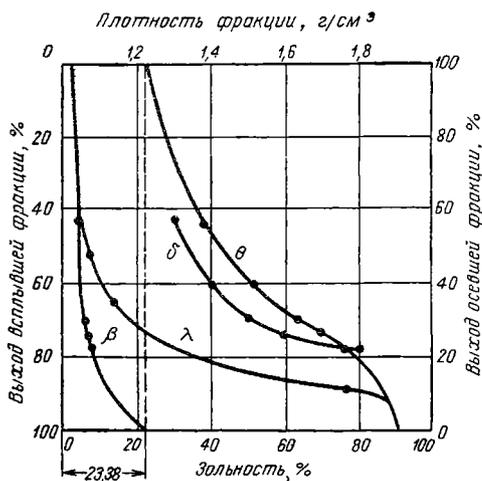


Рис. 63. Кривые обогатимости угля класса 0,5—3 мм шахты № 3/5 треста Советскуголь:

β — кривая всплывших фракций; λ — элементарная кривая распределения зольности; θ — кривая утонувших фракций; δ — кривая плотности разделения

Все опыты по обогащению угля в гидроциклоне в тяжелой суспензии, приготовленной из магнетита, измельченного до различной крупности, проведены при следующих условиях: диаметр сливного отверстия 35 мм, длина сливной трубки 35 мм, диаметр насадки 12 мм, угол конусности 20°, давление питания 2,7 атм.

Кривые обогатимости показаны на рис. 63.

Результаты обогащения угля в гидроциклоне при различной крупности утяжелителя суспензии приведены в табл. 31 и показаны на рис. 64. Этими исследованиями показано, что выход концентрата изменяется в очень небольших пределах (при изменении крупности суспензонта) и составляет 72—78%. Наибольший выход получается при обогащении угля в суспензии, приготовленной из магнетита, измельченного до 0,074 мм. Однако при этом имеет место некоторое повышение зольности концентрата.

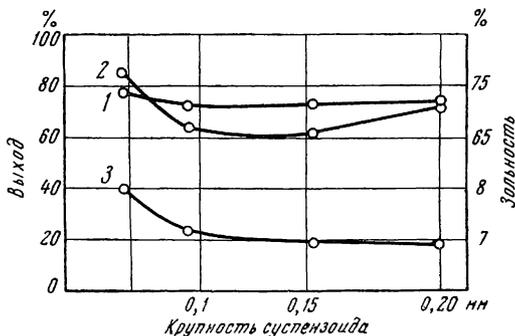


Рис. 64. Результаты обогащения угля в гидроциклоне при различной крупности утяжелителя:

1 — выход концентрата; 2 — зольность хвостов; 3 — зольность концентрата

Результаты обогащения угля крупностью 0,5—3 мм в гидроциклоне
при различной крупности утяжелителя (магнетит), %

Содержание класса —0,074 мм в утяжелителе	Концентрат		Хвосты		Зольность исходной пробы
	выход	зольность	выход	зольность	
<i>Первая серия опытов</i>					
47,4	74,5	6,78	25,5	71,95	23,40
67,2	72,2	6,86	27,8	66,43	23,42
88,8	73,1	7,30	26,9	67,19	23,41
100,0	78,0	7,99	22,0	78,18	23,43
<i>Вторая серия опытов</i>					
47,4	75,2	7,51	24,8	71,54	23,39
67,2	71,9	6,69	28,1	66,26	23,43
88,8	72,3	6,49	27,7	67,53	23,40
100,0	77,6	7,72	22,4	77,60	23,37
<i>Третья серия опытов</i>					
47,4	74,4	7,15	25,6	70,70	23,42
67,2	72,2	6,84	27,8	66,41	23,40
88,8	72,1	7,03	27,9	65,62	23,38
100,0	78,1	8,19	21,9	77,75	23,43

С увеличением крупности суспензоида до 0,1 и 0,15 мм улучшается качество концентрата, но одновременно снижается зольность хвостов. При крупности магнетита — 0,2 мм технологические показатели обогащения не только не ухудшились, а наоборот, улучшились. В этом случае незначительно изменились выход и зольность концентрата, но заметно повысилась зольность хвостов.

Таким образом, установлено, что при обогащении угля в гидроциклоне для приготовления тяжелой суспензии можно использовать магнетит, измельченный до — 0,2 мм.

Плотность суспензии

Эффективность обогащения угля в гидроциклоне изменяется также в зависимости от плотности применяемой суспензии.

Результаты обогащения угля в суспензии различной плотности приведены в табл. 32 и показаны на рис. 65.

Между плотностью суспензии и ее вязкостью существует прямая зависимость (рис. 66). Чем ниже плотность суспензии, тем меньше ее вязкость. Вязкость суспензии резко повышается при значительном содержании в ней угольных шламов, которые неизбежно остаются в процессе обогащения.

Как показано на рис. 67, небольшое содержание шламов оказывает незначительное влияние на вязкость магнетитовой суспензии.

Результаты обогащения угля в суспензии различной плотности

Плотность суспензии, г/см ³	Продукт	Выход, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Эффективность обогащения (общая), %
1,22	Концентрат	68,0	5,64	3,54	73
	Хвосты	32,0	34,27	8,16	
	Исходный	100,0	14,80	5,00	
1,23	Концентрат	79,3	6,20	4,20	84
	Хвосты	20,7	43,00	10,50	
	Исходный	100,0	14,00	5,50	
1,24	Концентрат	88,0	6,70	4,38	99
	Хвосты	12,0	65,70	10,70	
	Исходный	100,0	13,60	5,10	
1,25	Концентрат	89,0	5,94	3,89	99
	Хвосты	11,0	67,16	10,10	
	Исходный	100,0	12,70	4,57	
1,27	Концентрат	90,4	6,91	4,41	85
	Хвосты	9,6	62,96	12,71	
	Исходный	100,0	12,20	5,00	

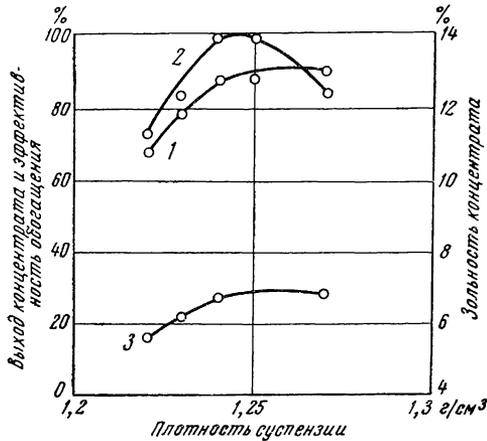


Рис. 65. Результаты обогащения угля в суспензии различной плотности:

1 — выход концентрата; 2 — эффективность обогащения; 3 — зольность концентрата

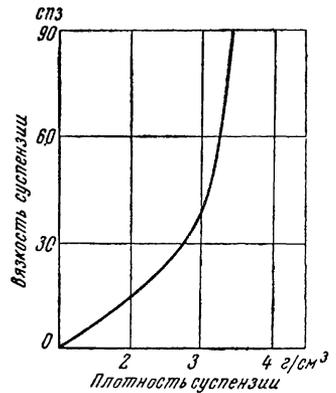


Рис. 66. Зависимость вязкости магнетитовой суспензии от ее плотности

Резкое повышение вязкости происходит при содержании в суспензии свыше 20—25% шламов. Это обстоятельство вызывает необходимость тщательной дешламации угля перед его обогащением в тяжелой суспензии, чтобы не допускать значительного накапливания шламов в сепараторе.

При выборе утяжелителя для приготовления суспензии учитывается критическая плотность, выше которой происходит резкое повышение вязкости суспензии. На рис. 68 показано изменение вязкости суспензии в зависимости от содержания в ней угольных шламов.

Уменьшением плотности суспензии в пределах критической можно значительно снизить вязкость суспензии. Однако при этом следует учитывать плотность зерен обогащаемого материала, которые должны всплывать в суспензии.

Плотность и вязкость суспензии в совокупности изменяют соотношение сил, действующих на твердые частицы при обогащении угля в гидроциклоне. При прочих постоянных условиях, величина центробежной силы, действующей на твердую частицу, является функцией плотностей среды ρ_0 и самой частицы ρ :

$$C = f(\rho_0; \rho), \quad (86)$$

тогда как величина сопротивления среды движению частицы зависит только от изменения плотности среды. Поэтому относительное действие центробежной силы для частиц, имеющих плотность $\rho > \rho_0$, будет меньше в более плотных суспензиях, а для частиц плотностью $\rho < \rho_0$, наоборот, будет больше.

Следовательно, чрезмерное повышение плотности суспензии при обогащении угля в гидроциклоне должно вызывать повышение зольности концентрата и снижение зольности хвостов (см. табл. 32).

В табл. 33 приведены данные о распределении плотности суспензии в гидроциклоне при обогащении углей. Своеобразие гидродинамических условий в гидроциклоне способствует более рациональному распределению в нем утяжелителя суспензии, что позволяет применять менее плотные суспензии, чем при обогащении в обычных сепараторах.

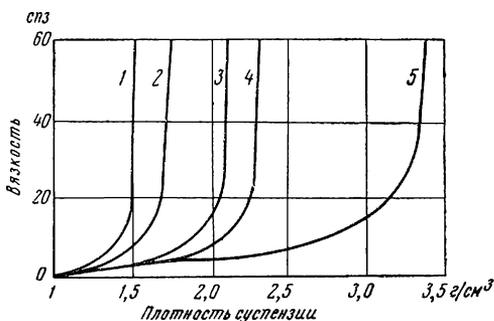


Рис. 67. Критические плотности различных суспензий:

1 — сланец; 2 — кварц; 3 — барит; 4 — магнетит; 5 — ферросилицит

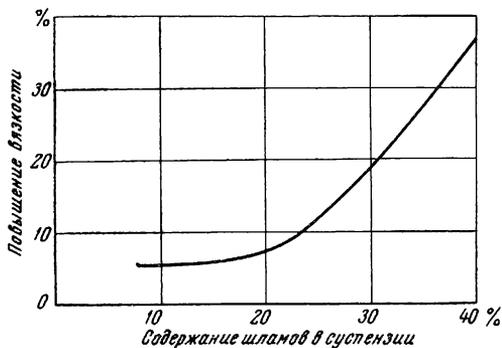


Рис. 68. Изменение вязкости суспензии в зависимости от содержания в ней угольных шламов

Плотность суспензии в гидроциклоне при различных условиях обогащения угля (гидроциклон диаметром 80 мм, угол конусности 20°, давление питания 2,8 атм., плотность суспензии 1,25 г/см³, крупность магнетита 0,1 мм, крупность угля 0,5—2 мм, диаметр сливной трубки 35 мм, диаметр насадки 13 и 10 мм)

Зоны измерения	Радиус измерения, мм	Плотность суспензии, г/см	
		вертикальный гидроциклон	наклонный гидроциклон
1	40	1,150	1,20
	35	1,080	1,11
	30	1,055	1,07
	25	1,058	1,06
	20	1,053	1,06
	40	1,270	1,27
2	35	1,210	1,22
	30	1,130	1,18
	25	1,080	1,09
	20	1,080	1,11
	15	1,060	1,07
	35	1,680	1,60
3	30	1,620	1,51
	25	1,360	1,31
	20	1,240	1,28
	15	1,200	1,25
	30	2,450	2,26
4	25	2,380	2,19
	20	2,110	2,05
	15	1,920	1,88
	25	2,680	2,42
5	20	2,600	2,35
	15	2,480	2,22
6	20	2,860	2,39
	15	2,580	2,30

Т а б л и ц а 34

Плотность разделения при обогащении угля в тяжелой суспензии различной плотности

Плотность суспензии, г/см ³	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27
Плотность разделения, г/см ³	1,39	1,42	1,48	1,52	1,63

Изменение плотности суспензии при обогащении угля в гидроциклоне происходит по высоте и вдоль его радиуса (рис. 69).

При применении магнетитовой суспензии плотностью 1,25 г/см³ плотность среды в цилиндрической части гидроциклона вдоль его радиуса изменяется от 1,28 до 1,07 г/см³, уменьшаясь в направлении

движения к сливной трубке. По мере перемещения суспензии вниз плотность его повышается, достигая наибольшего значения вблизи разгрузочной насадки. В верхней зоне конической части гидроциклона плотность суспензии изменяется вдоль радиуса от 1,6 до 1,2 $г/см^3$ у границ воздушного столба. В средней зоне конуса гидроциклона, где происходит выделение наиболее тяжелых фракций угля, минимальная плотность суспензии у границ воздушного столба равна 1,8 $г/см^3$. Такое изменение плотности суспензии в гидроциклоне создает благоприятные условия для разделения угольных и породных зерен при их перемещении вдоль радиуса и в направлении к разгрузочной насадке.

Исследования показали, что при обогащении углей в гидроциклоне во всех случаях плотность разделения превышает плотность рабочей суспензии (табл. 34).

Это повышение плотности происходит вследствие увеличения времени пребывания частиц утяжелителя в гидроциклоне по сравнению с временем нахождения воды, а также вследствие специфического характера распределения плотностей суспензии в этом аппарате.

Плотность разделения

Эффективность обогащения угля в тяжелых суспензиях изменяется в зависимости от плотности разделения, которая в гидроциклоне обуславливается не только плотностью суспензии, но и гидродинамическими факторами, зависящими от размеров входного, разгрузочного и сливного отверстий, давления на входе в гидроциклон и др. В табл. 35 приведены результаты обогащения угля при различных диаметрах разгрузочной насадки, а на рис. 70 показана кривая

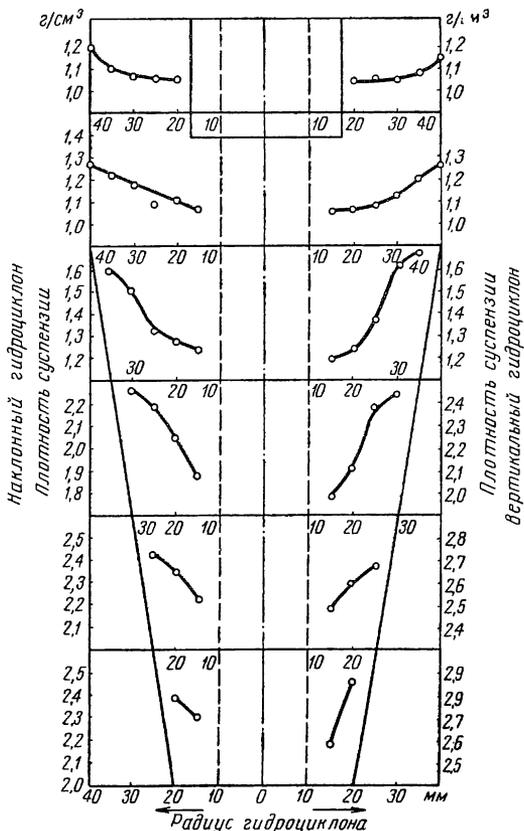


Рис. 69. Изменение плотности магнетитовой суспензии в гидроциклоне

пребывания частиц утяжелителя в гидроциклоне по сравнению с временем нахождения воды, а также вследствие специфического характера распределения плотностей суспензии в этом аппарате.

Плотности разделения и результаты обогащения угля при различных диаметрах разгрузочной насадки

Диаметр насадки, мм	Отношение диаметров сливного отверстия трубки и разгрузочной насадки	Плотность разделения, г/см ³	Продукт	Выход, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Эффективность обогащения (общая), %
16	2,3	1,29	Концентрат	52,0	4,50	3,28	73,0
			Хвосты	48,0	25,80	8,30	
			Исходный	100,0	14,85	5,70	
14	2,5	1,35	Концентрат	57,5	4,30	3,23	84,0
			Хвосты	42,5	27,90	7,44	
			Исходный	100,0	14,97	5,15	
12	2,9	1,42	Концентрат	72,8	6,00	4,10	99,9
			Хвосты	27,2	40,00	9,12	
			Исходный	100,0	15,00	5,42	
8	4,4	1,68	Концентрат	90,0	6,84	4,08	97,0
			Хвосты	10,0	66,20	10,61	
			Исходный	100,0	12,77	4,72	

зависимости плотности разделения от диаметра разгрузочного отверстия. Плотность разделения во всех случаях выше плотности исходной суспензии. Она повышается при уменьшении диаметра разгрузочной насадки с увеличением диаметра сливного отверстия, т. е. находится в зависимости от отношения диаметров этих отверстий. Однако линейной зависимости между диаметрами разгрузочного и сливного отверстий и плотностью разделения не наблюдается.

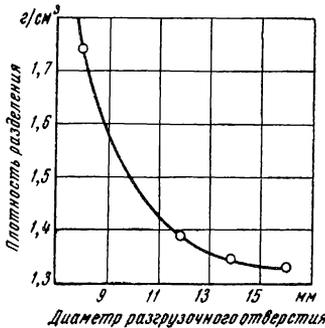


Рис. 70. Зависимость плотности разделения от диаметра разгрузочного отверстия

Плотность разделения зависит и от угла конусности гидроциклона, она повышается при уменьшении этого угла. Плотность разделения, при прочих равных условиях, повышается также и от уменьшения входного отверстия гидроциклона. Оптимальная плотность

суспензии зависит от относительной крупности частиц угля и утяжелителя.

Существует следующая зависимость между оптимальной плотностью суспензии и крупностью частиц угля и утяжелителя [45]:

$$\rho_{\text{эф}} = \rho_c + (\rho - \rho_c) \left(\frac{d}{D} \right)^{1-\varphi}, \quad (87)$$

где $\rho_{\text{эф}}$ — эффективная (оптимальная) плотность суспензии для частиц угля диаметром D ;

ρ_c — плотность суспензии;

- ρ — плотность частиц утяжелителя;
 d — диаметр частиц утяжелителя;
 φ — коэффициент, зависящий от характера движения жидкости:
 $\varphi = -1$ (по Стоксу);
 $\varphi = -0,5$ (по Аллену);
 $\varphi = 0$ (по Риттенгеру).

Практика применения гидроциклона показывает, что плотность разделения фактически не зависит от крупности обогащаемого угля. Обогащение угля в гидроциклоне с использованием магнетитовой суспензии можно вести при очень низкой плотности разделения ($1,3 \text{ г/см}^3$) или при высокой, достигающей до 2 г/см^3 и выше.

Небольшая емкость гидроциклона позволяет достаточно быстро изменять плотность разделения, что является весьма важным при автоматической регулировке технологического процесса обогащения.

Одним из важных достоинств гидроциклона является и то, что существенные изменения нагрузки не влияют на технологические показатели обогащения.

Сравнение различных способов обогащения мелкого угля

В Бельгии проводились сравнения способов обогащения мелкого угля в тяжелой суспензии в гидроциклоне, отсадкой и флотацией [14].

Результаты обогащения в гидроциклонах брались с фабрики «Гертр», где обеспыленный мелкий уголь обогащается на гидроциклонной установке производительностью 200 т/ч . Установка состоит из четырех горизонтально установленных циклонов диаметром 500 мм для первичного обогащения и двух таких же циклонов для перерешетки продукта.

В качестве утяжелителя суспензии используется магнетит. Регенерация суспензии производится по обычной схеме с предварительной отмывкой на грохотах и магнитной сепарацией. Опыт эксплуатации показал, что легкие фракции угля при низкой плотности разделения в гидроциклонах попадают в хвосты вследствие механического уноса мелочи более крупными частицами тяжелой фракции.

Установлено, что при обогащении угля на этой фабрике в гидроциклоне происходит хорошее разделение мелочи до $0,2 \text{ мм}$ и удовлетворительное для класса $0,1-0,2 \text{ мм}$. Коэффициент несовершенства составляет для класса $0,5-1 \text{ мм}$ — $0,075$, а для класса $0,1-0,2 \text{ мм}$ — $0,177$. На фабрике «Герибюс» обеспыленный мелкий уголь обогащался в отсадочной машине фирмы «РУС». Результаты флотации угля были взяты с фабрики «Уэст де Монс», где работают флотомашинные системы «Женераль де минералэ» производительностью 20 т/ч .

Для эффективного обогащения угля крупностью $+0,2$ или $+0,1 \text{ мм}$ в гидроциклоне тяжелая суспензия должна иметь минимальную вязкость, чтобы обеспечить высокую точность разделения. Для этой цели удовлетворительной считается суспензия, в которой содержится

80% магнетита и 20% угольного шлама. В 1 м³ такой суспензии плотностью 1,4 г/см³ содержится 430 кг магнетита и 107 кг угольного шлама. Скорость циркуляции суспензии в гидроциклонной установке составляет примерно 700 м³/ч. Таким образом, в циркуляции находится 75 т/ч угольных и породных шламов размером — 0,5 мм.

Т а б л и ц а 36

Показатели разделения мелких классов при обогащении угля различными способами

Способ обогащения	Класс, мм	Эффективная плотность разделения, г/см ³	Вероятное отклонение	Коэффициент несовершенства
В гидроциклонах (в тяжелой суспензии)	0,3—0,5	1,694	0,075	0,108
	0,2—0,3	1,812	0,108	0,133
	0,1—0,2	2,065	0,189	0,177
В отсадочной машине	0,3—0,5	2,220	0,220	0,180
	0,2—0,3	2,450	0,290	0,200
	0,1—0,2	2,530	0,290	0,190
Флотацией	0,3—0,5	1,483	0,134	0,277
	0,2—0,3	1,486	0,149	0,306
	0,1—0,2	1,533	0,182	0,342

Т а б л и ц а 37

Показатели обогащения угольной мелочи различными способами

Способ обогащения	Класс, мм	Выход конденсата, %	Зольность, %		Извлеченное горючего вещества, %
			концентрата	хвостов	
Рядовой уголь	0,315—0,5	100,00	21,34	—	100,00
	0,2—0,315	100,00	23,68	—	100,00
	0,1—0,2	100,00	24,27	—	100,00
В гидроциклонах	0,315—0,5	76,86	6,92	69,23	97,91
	0,2—0,315	75,89	8,91	70,14	96,16
	0,1—0,2	79,11	12,11	70,35	95,22
В отсадочных машинах фирмы «РУС»	0,315—0,5	86,97	13,53	73,45	97,37
	0,2—0,315	89,19	17,69	73,12	97,45
	0,1—0,2	89,89	18,70	73,80	97,65
Пенная флотация	0,315—0,5	67,02	5,76	52,99	88,70
	0,2—0,315	64,09	6,58	54,18	86,36
	0,1—0,2	65,16	7,35	55,93	86,53

При нормальной регенерации суспензии со сливом удаляется 7—8 т/ч шлама. Чтобы содержание шлама в суспензии оставалось постоянным, количество мелких классов — 0,5 мм не должно превышать 3,5—4%. На обогатительной фабрике «Гертр» содержание класса — 0,5 мм в угле, поступающем на гидроциклонную установку, доходит до 9%, поэтому приходится выводить из системы циркуляции часть потока рабочей суспензии.

В табл. 36 приведены показатели разделения мелких классов при обогащении угля различными способами.

Для сравнения результатов обогащения угольной мелочи различными способами на трех рассматриваемых фабриках был взят одинаковый уголь для коксования и на основании данных фракционного анализа, кривых обогатимости и кривых разделения рассчитаны показатели обогащения, приведенные в табл. 37. Эти данные показывают, что при обогащении угля в гидроциклонах получаются вполне удовлетворительные показатели как по качеству концентрата, так и по извлечению в него горючего вещества.

Технологические схемы и гидроциклонные установки

Первая в СССР установка для обогащения углей в гидроциклонах в магнетитовой суспензии была сооружена при обогатительной фабрике Губахинского коксохимического завода.

Схема установки показана на рис. 71.

Обогащению подвергались труднообогащаемые угли шахты № 6 Кизеловского бассейна (класс 0,5—6 мм) в гидроциклоне диаметром 200 мм при давлении питания 2 атм. Производительность установки 3,5 т/ч.

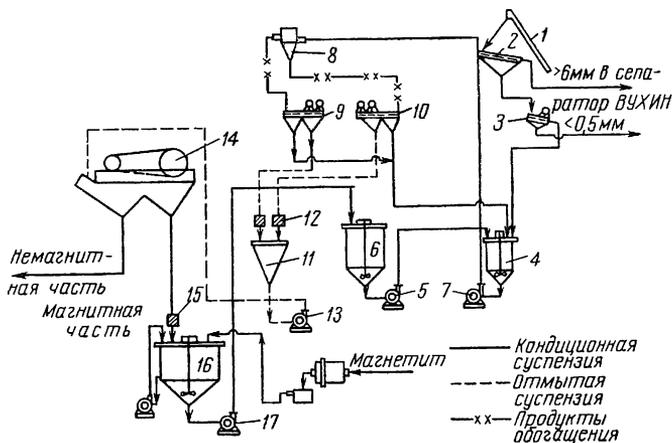


Рис. 71. Схема полупромышленной установки ВУХИН для обогащения углей в гидроциклонах: 1 — элеватор; 2 — грохот; 3 — дешламационный грохот; 4 и 6 — смесители; 5, 7, 13, 17 — насосы; 8 — гидроциклон; 9 и 10 — грохоты для отделения и промывки продуктов обогащения; 11 — конусный сгуститель; 12 — намагничивающий аппарат; 14 — ленточный магнитный сепаратор; 15 — размагничивающий аппарат; 16 — сборный бак для суспензии

Для приготовления суспензии использовался магнетит следующего гранулометрического состава:

Крупность, мм	Выход, %
+0,149	1,7
0,105—0,149	1,9
0,074—0,105	3,4
0,044—0,074	2,6
—0,044	90,4

100,0	

В результате обогащения были получены два продукта: концентрат зольностью 9,43% при выходе ~70% и порода зольностью 63% при выходе 30%. Зольность исходного угля 25,65%.

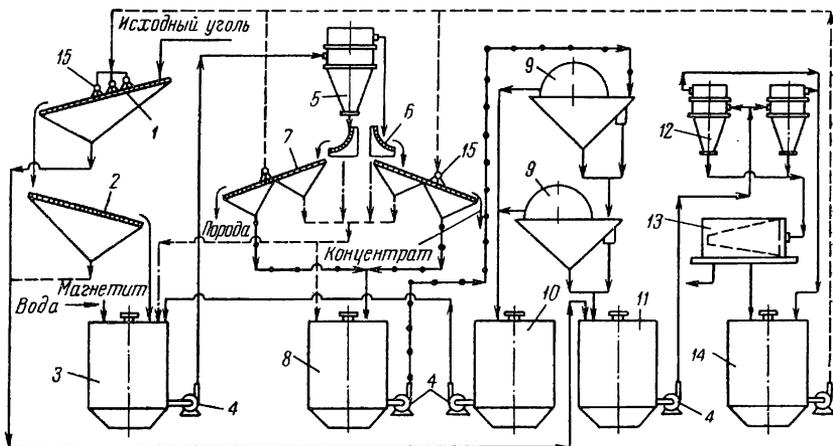


Рис. 72. Технологическая схема обогащения мелких классов углей в гидроциклоне с магнетитовой суспензией на Жилевской ОПОФ:

1 и 2 — дещламационные грохоты; 3 — сборник рабочей суспензии; 4 — пасосы; 5 — обогатительный гидроциклон \varnothing 350 мм; 6 — дуговые сита; 7 — грохоты для обезвоживания продуктов обогащения и отмывки утяжелителя; 8 — сборник разбавленной суспензии; 9 — магнитные сепараторы типа 167А-СЭ; 10 — сборник для концентрата магнитных сепараторов; 11 — сборник шламовых вод; 12 — осветительные гидроциклоны \varnothing 250 мм; 13 — осадительная центрифуга; 14 — сборник осветленной воды; 15 — брызгалка

Расход воды для отмывки продуктов обогащения от утяжелителя составил $10,4 \text{ м}^3/\text{т}$ угля. В промывной воде, расходуемой на 1 т обогащаемого угля, содержалось 174 кг твердого, в том числе 75 кг магнетита.

На Жилевской опытно-промышленной обогатительной фабрике была сооружена гидроциклонная установка (рис. 72), где проводились испытания по обогащению углей шахты «Шолоховская-Южная» (Донбасс) и шахт треста Краснодонуголь [10, 24].

Технологическая схема обогащения угля шахты «Шолоховская-Южная» показана на рис. 73, а схема обогащения многосернистого угля шахт треста Краснодонуголь — на рис. 74.

Обогащение угля проводилось в гидроциклоне диаметром 350 мм, с углом конусности 40°, при давлении на входе 1,5 атм, производительности 40 м³/ч пульпы (Т : Ж = 1 : 5).

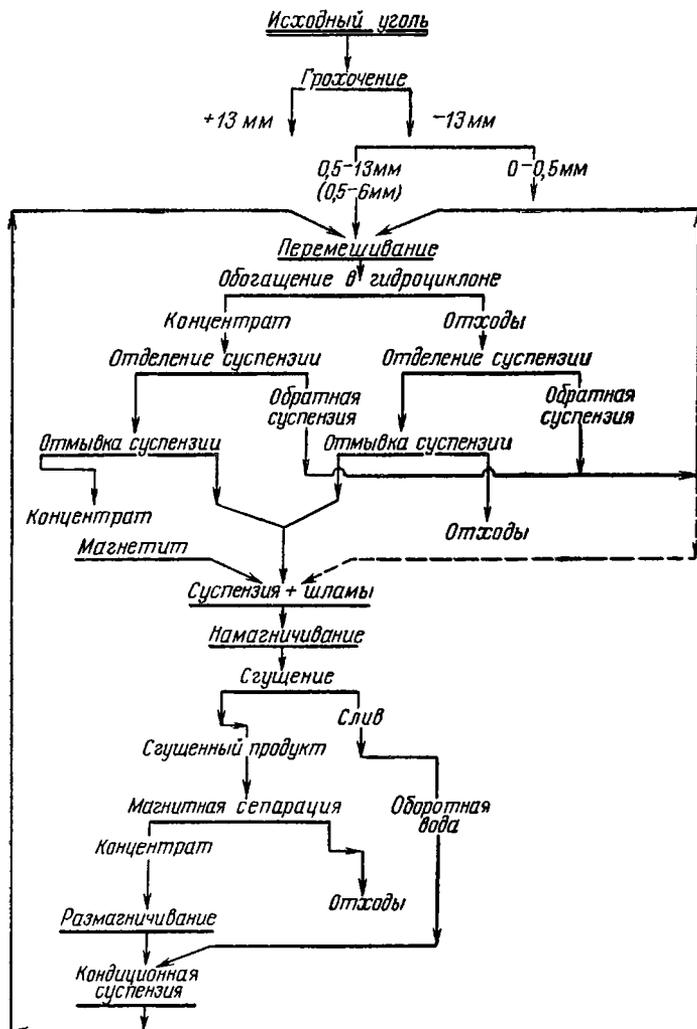


Рис. 73. Технологическая схема обогащения угля шахты «Шолоховская-Южная».

В качестве утяжелителя для приготовления суспензии использовался магнетит обогатительной фабрики ЮГОЖа со следующей характеристикой: плотность 4,28 г/см³, содержание магнитной фракции 93,5%, содержание железа (при влажности 4%) 59%.

Гранулометрический состав магнетита:

Крупность, мм	Выход, %
+0,5	0,5
0,25—0,5	2,5
0,16—0,25	3,2
0,074—0,16	22,7
—0,074	71,1

100,0	

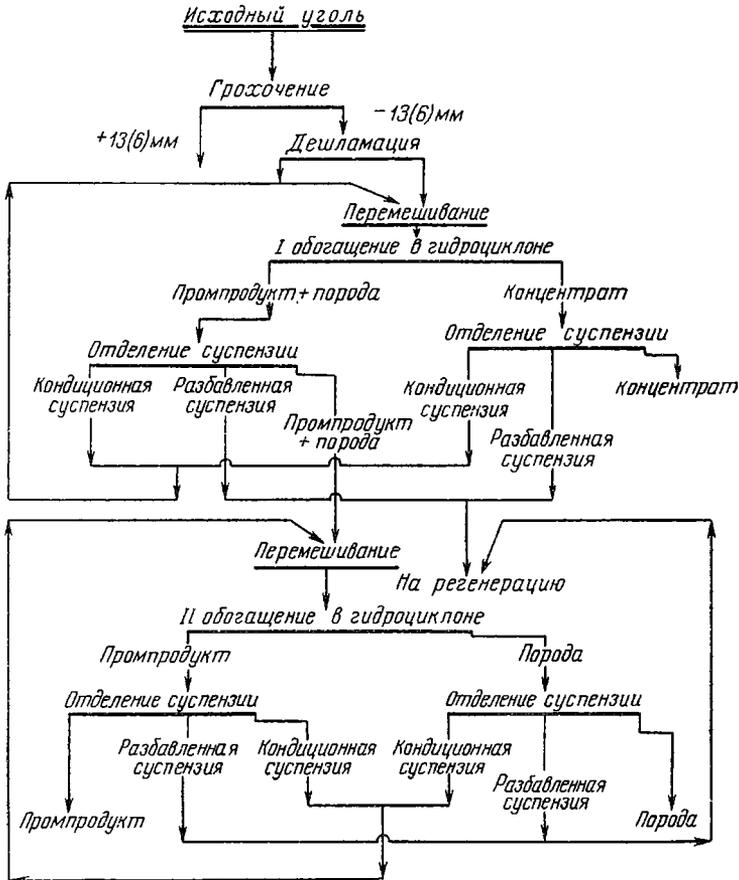


Рис. 74. Технологическая схема обогащения многосернистого угля шахт треста Краснодонуголь

При обогащении углей шахты «Шолоховская-Южная» в гидроциклонах в одну стадию при плотности разделения $1,55 \text{ г/см}^3$ можно получить концентрат зольностью менее 7% и породу зольностью свыше 78% (табл. 38), а при обогащении многосернистых углей треста Краснодонуголь удастся значительно снизить содержание серы в них.

Результаты обогащения углей на установке Жилевской ОПОФ

Продукт	Угли шахты «Шолоховская-Южная»			Многосерпистые угли шахт треста Красноподуголь			
	Плотность разделения, г/см ³	Выход, %	Зольность, %	Плотность разделения, г/см ³	Выход, %	Зольность, %	Содержание серы, %
Концентрат	1,55	54,6	6,8	1,29	63,4	3,47	2,52
Промпродукт	—	—	—	1,8	24,6	12,83	4,90
Порода	—	45,4	78,2	—	12,0	72,73	8,70
Исходный	—	100,0	39,2	—	100,0	14,14	3,85

На обогатительной фабрике «Черкасская-Северная» № 1 в эксплуатации находится гидроциклонная установка [12] производительностью 100 т/ч для обогащения угля крупностью — 12 мм (рис. 75).

В качестве утяжелителя для приготовления суспензии используются глина и пирит, выделенные из циркуляционных вод фабрики.

Подрешетный продукт классификационного грохота (класс — 12 мм) поступает в мешалку для смешивания с рабочей суспензией. Суспензия приготовлена из сгущенного продукта подготовительных гидроциклонов, обогащенного пиритом до 15—18% (плотность 1,75—1,8 г/см³), и подрешетного продукта обезвоживающего грохота породы, смешанного со сгущенными подрешетными шламами обезвоживающих грохотов крупного и мелкого концентратов. Уголь вместе с суспензией плотностью 1,35—1,4 г/см³ подается в четыре гидроциклона-сепаратора. Все гидроциклоны расположены на одной площадке наклонно под углом 12° к горизонту. Полученные в результате обогащения концентрат и порода направляются на обезвоживающие грохоты для отмывки от суспензии, после чего зольность концентрата составляет 9—11%, а породы — 70—75%.

Окнательное обезвоживание концентрата осуществляется в центрифугах ВШ-10, где влажность его снижается до 8—9%.

Фугат центрифуг совместно со сливом подготовительных гидроциклонов поступает в отстойную центрифугу УЦМ-IV. Обезвоженный продукт центрифуги присоединяется к концентрату, а фугат подается в бак циркуляционной воды желобной мойки.

В настоящее время в большинстве европейских стран с развитой угледобывающей промышленностью работают гидроциклонные установки для обогащения мелкого угля. Обычно обогащению подвергается мелкий уголь или дробленый промпродукт крупностью от 0,5 до 13 мм. Для обогащения, как правило, применяется магнетитовая суспензия в количестве 3—5 м³ на 1 т угля. Исходный уголь с грохота подается в напорные баки, расположенные на 4—10 м выше гидроциклона, откуда вместе с суспензией поступает в гидроциклон.

Чаще всего обогащение в гидроциклонах осуществляется в одну стадию. Но имеются случаи обогащения в две стадии, причем в первой стадии плотность рабочей суспензии составляет 1,3, а во второй — 1,8 г/см³.

Для обогащения применяются гидроциклоны диаметром 350—630 мм, угол конусности в этих гидроциклонах составляет 20—60°. Давление питания достигает 1,5 *ати*. Производительность гидроциклона диаметром 350 мм при обогащении угля крупностью 0,5—6 мм составляет 25 т/ч.

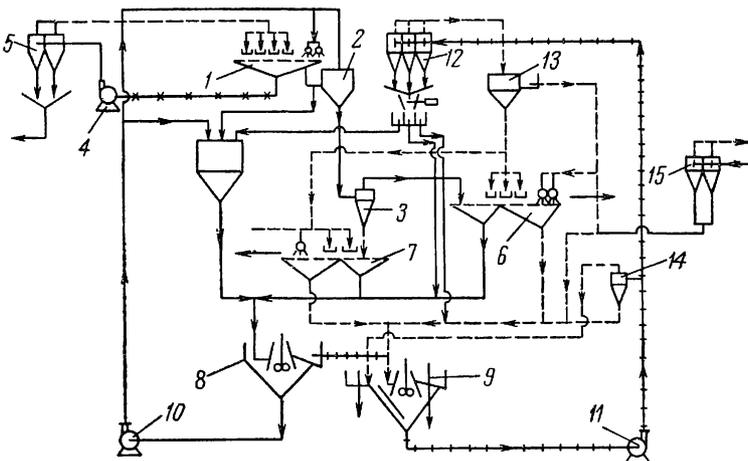


Рис. 76. Схема опытной обогатительной установки с гидроциклонами для обогащения мелкого угля при шахте «Эмма» (Голландия):

1 — дешламационный грохот; 2 — смеситель; 3 — циклон-сепаратор; 4, 10, 11 — насосы; 5 — циклоны-сгустители; 6 и 7 — грохоты обезвоживания и промывки продуктов обогащения; 8 и 9 — флотационные машины; 12 — циклоны-сгустители; 13 — напорный бак; 14, 15 — циклоны-классификаторы

Впервые обогатительная установка, оборудованная гидроциклонами, была построена в Голландии при шахте «Эмма» для обогащения каменного угля крупностью 0—12 мм и зольностью 43,4% (рис. 76). Производительность установки 27,5 т/ч.

На обогащение в гидроциклон поступает обезшламленный уголь класса 0,5—9 мм в смеси с суспензией из тонкоизмельченной породы, содержащейся в этом угле.

Верхний и нижний продукты обогащения поступают на грохот, где происходит их отмывка от суспензии.

Регенерация суспензии производится с помощью флотации. Суспензия, содержащая мелкий уголь, с первой части грохотов подается во флотомашину, концентрат с которой направляется во вторую флотомашину, куда одновременно поступает разбавленная суспензия со второй части грохотов. Хвосты флотации идут на сгущение в гидроциклоны, затем используются для приготовления рабочей суспензии.

В результате обогащения получается концентрат зольностью около 4,7% при выходе 40% и порода зольностью 69—70% при выходе 60%. Обогащение происходит при плотности разделения 1,52 г/см³. Плотность исходной суспензии 1,41 г/см³.

Фракционный анализ продуктов обогащения показывает, что засорение концентрата фракциями плотностью > 1,5 г/см³ незначительно (~1,6%), а породы — фракциями плотностью < 1,5 г/см³ около 0,8%.

Для сравнения на этой же установке производилось обогащение мелкого угля крупностью 0,85—12,5 мм и зольностью 22,6% в магнетитовой суспензии, для приготовления которой магнетит измельчался в шаровой мельнице, работавшей в замкнутом цикле с классификатором.

Обогащение велось при плотности разделения 1,75 г/см³. Фракционный анализ продуктов обогащения показывает, что содержание в концентрате фракций плотностью > 1,75 составляет около 1,5%, а фракций плотностью < 1,75 в породе — 0,5%.

Эффективная регенерация магнетитовой суспензии с помощью двух последовательно установленных магнитных сепараторов позволяет отказаться от предварительной дешламации угля. Потери магнетита составили около 0,5 кг на 1 т обогащаемого угля.

В Чехословакии на полупромышленной установке производительностью 10 м³/ч оборудованной гидроциклонами, обогащался бурый уголь (труднообогащаемый) с содержанием золы 21,6%, крупностью 0—12 мм. В качестве утяжелителя суспензии использовалась измельченная порода, извлекаемая из этих углей. Обогащение проводилось при следующих условиях: давление на входе 1,5 атм, угол конусности гидроциклона 60° (45°), плотность суспензии 1,121 г/см³ плотность разделения 1,377 г/см³. Были получены концентрат класса 2—12 мм зольностью 10,2% при выходе 42,9% и промпродукт класса 2—12 мм зольностью 32,9% при выходе 22,7%.

Схема установки показана на рис. 77. Исходный уголь поступает на грохот 1 для предварительного грохочения и ополаскивания с целью предотвращения образования комков. С грохота класс 0—12 мм поступает сначала в сборник 2, а затем для смешивания с рабочей суспензией в мешалку 3, откуда насосом 4 подается в четыре обогащительных гидроциклона 5. Верхний и нижний продукты гидроциклонов поступают на грохоты 6 и 7. На первой части грохотов (ширина щели 2 мм) происходит отделение суспензии, на второй (ширина щели 1 мм) — ополаскивание водой и обезвоживание продуктов обогащения.

Подрешетный продукт первой части обезвоживающего грохота 7 насосом 8 подается в четыре классификационных гидроциклона 9 диаметром 350 мм. Верхний продукт гидроциклонов направляется в сборник 2 или в мешалку 3, а нижний продукт — на первую часть грохота 10. На вторую часть грохота 10 поступает подрешетный продукт второй части грохота 7. На грохоте 10, имеющем отверстия сит 0,3 мм, отделяются крупнозернистые шламы, а подрешетные продук-

ты направляются с первой части грохота в мешалку 3, а со второй — в сборник 11, откуда насосом 12 подаются в гидроциклон-сгуститель 13. Сгущенный продукт гидроциклона направляется в центрифугу 14, а слив — в отстойник 15, из которого осветленная вода идет на ополаскивание продуктов обогащения на грохотах 6 и 7. Подрешетные продукты грохота 6 поступают на грохот 16, выполняющий те же функции, что и грохот 10.

В результате обогащения угля на данной установке были получены концентрат класса 2—12 мм зольностью 10,2% при выходе

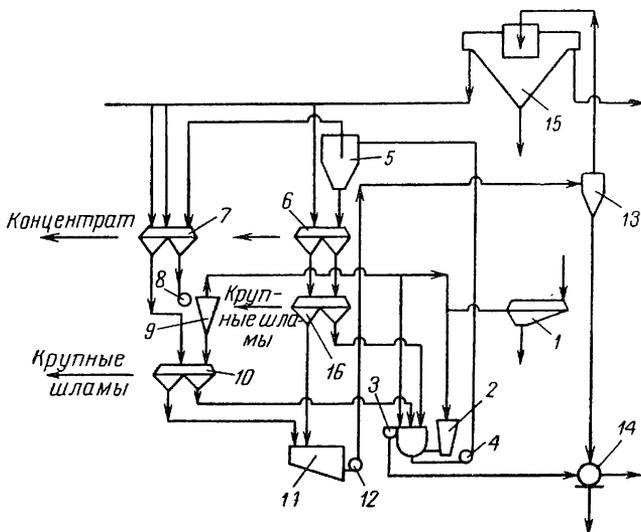


Рис. 77. Схема опытной обогатительной установки с гидроциклонами для обогащения мелкого бурого угля (Чехословакия)

42,9% и промпродукт этого же класса зольностью 32,9% при выходе 22,7%.

Основным условием успешного обогащения этих углей явилось применение вибрационного грохота со шелевидным ситом (размер щели 2 мм) для отмывки продуктов обогащения от суспензии.

Гидроциклонная установка при шахте «УВ» (Франция) производительностью 200 т/ч обогащает угли класса 0—10 мм зольностью 24,8% (рис. 78). Обогащение ведется в две стадии: по плотности 1,56—1,58 и 1,74—1,75 г/см³, причем давление на входе на первой стадии 0,8 ати, а на второй — 1,5 ати. Суспензия приготовлена из магнетита, в котором содержание класса 0,04—0,16 мм составляет 70%, класса 0,02—0,04 мм — 20%. Расход воды 0,6—0,8 м³/т.

В результате обогащения получены концентрат зольностью 9,7% при выходе 79%, промпродукт зольностью 53,6% при выходе 3% и хвосты зольностью 83,6% при выходе 18%.

На фабрике «Найн Майл Поинт» (Англия) в гидроциклонах обогащают уголь класса 0,5—4,5 мм зольностью 19,2% в количестве

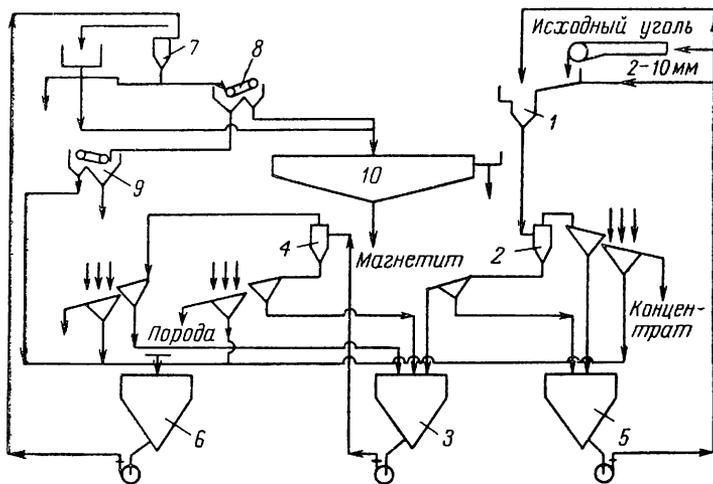


Рис. 78. Схема гидроциклонной установки при шахте «УВ» (Франция):

1 — бак-смеситель; 2 — гидроциклон; 3 — бак-смеситель с суспензией высокой плотности; 4 — перечисный гидроциклон; 5 — бак для суспензии низкой плотности; 6 — бак для разжиженной суспензии; 7 — гидроциклон-сгуститель; 8, 9 — магнитные сепараторы; 10 — сгуститель для магнетита

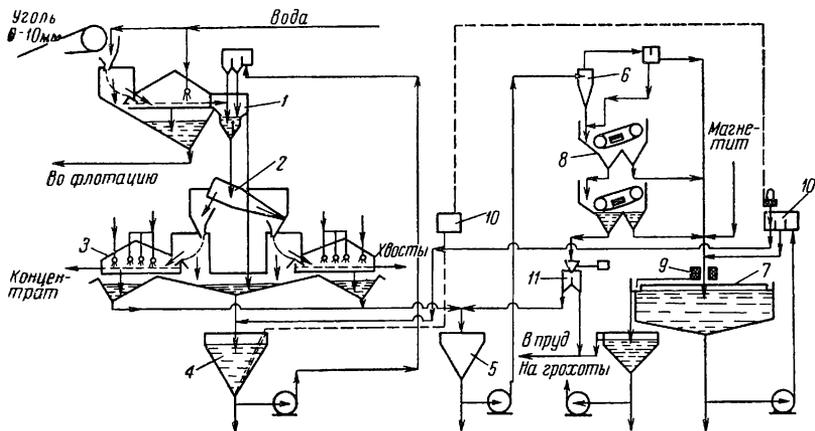


Рис. 79. Схема обогащения угля на фабрике «Найн Майл Поинт» (Англия):

1 — смесительный бак; 2 — гидроциклон; 3 — дренажно-промывочный грохот; 4 — бак для суспензии плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$; 5 — бак для разжиженной суспензии; 6 — гидроциклон-сгуститель; 7 — сгуститель; 8 — магнитные сепараторы; 9 — магнетизатор; 10 — аппарата для регулирования плотности; 11 — переключатель пульсы

100 т/ч при плотности разделения $1,5 \text{ г/см}^3$ (рис. 79). В результате обогащения получается концентрат зольностью 5,6% и хвосты зольностью 77—82%. Потери магнетита составляют 1 кг/т.

В ФРГ гидроциклоны используются для обогащения мелкого угля и промпродукта отсадки. На рис. 80 представлена схема стандартной промышленной установки для обогащения угля.

Дешламированный мелкий уголь подается в смеситель, куда одновременно поступает тяжелая суспензия, затем пульпа под напором поступает в гидроциклон-сепаратор, где происходит разделение угля на концентрат и породу. Продукты обогащения поступают на обезвоживающие грохоты. На первой части грохотов происходит отделение кондиционной суспензии, а на второй — отмывка и ополаскивание продуктов обогащения.

Кондиционная рабочая суспензия поступает в смеситель, а разбавленная — в гидроциклон-сгуститель. Слив гидроциклона идет на ополаскивание продуктов обогащения, а сгущенный продукт — на два последовательно установленных магнитных сепаратора. Магнитный продукт сепараторов поступает в радиальный сгуститель, откуда насосами качается в циркуляционную систему рабочей суспензии. Магнетит измельчается в шаровой мельнице, работающей в замкнутом цикле с гидроциклоном-классификатором.

Установка гидроциклонов при шахте «Виктория» (ФРГ) производительностью 30—40 т/ч предназначена для обогащения угля класса 0,5—10 мм. Обогащение производится по плотностям 1,45 и 1,90 г/см³ в двух последовательно установленных гидроциклонах диаметром 350 мм. В результате обогащения получается концентрат зольностью 4,5% при выходе 50% и хвосты зольностью 72% при выходе 20—30%. Расход магнетита составляет 0,5 кг/т.

В США установки для обогащения мелкого угля в тяжелой суспензии в гидроциклонах оборудованы циклонами-сепараторами, изготовляемыми фирмой «Сейнамид».

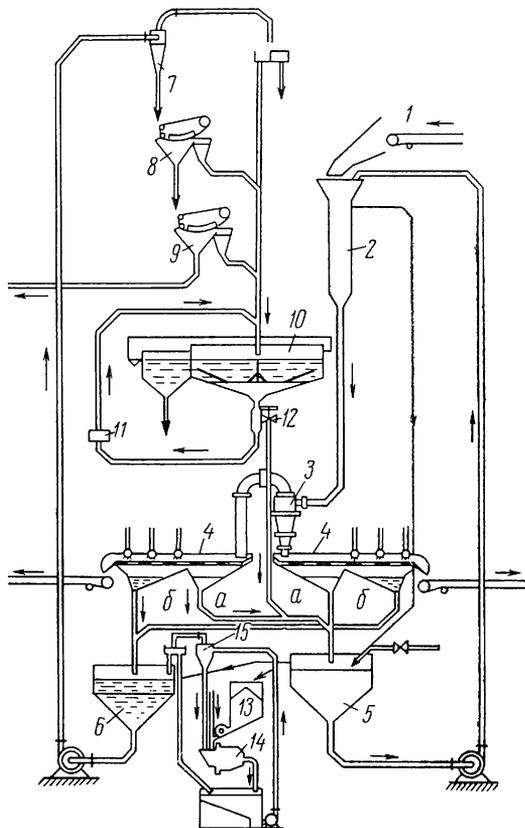


Рис. 80. Схема промышленной установки для обогащения углей в гидроциклоне (ФРГ):

- 1 — конвейер; 2 — смеситель; 3 — циклон-сепаратор; 4 — грохоты для обезвоживания и промывки продуктов обогащения; 5 — сборник для рабочей суспензии; 6 — сборник для разбавленной суспензии; 7 — циклон-сгуститель; 8, 9 — ленточные магнитные сепараторы; 10 — радиальный сгуститель; 11 — диафрагменный насос; 12 — клапан автоматического регулятора; 13 — бункер для магнетита; 14 — шаровая мельница; 15 — циклон-классификатор

На установках обогащается уголь крупностью 0,4—6 мм с получением концентрата и хвостов. Давление питания 1,3—1,5 атм. Для регенерации суспензии применяются магнитные сепараторы.

2. ОБОГАЩЕНИЕ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

При обогащении угольной мелочи крупностью 0,5—3 мм в гидроциклоне в тяжелой суспензии получаются качественные и количественные показатели, весьма близкие к теоретически возможным. Однако применение тяжелой суспензии вызывает усложнение схемы технологического процесса, повышает эксплуатационные расходы и себестоимость обогащения. При обогащении в тяжелой суспензии появляются дополнительные затраты на приобретение и приготовление утяжелителя, возникает необходимость в регенерации суспензии и тщательной промывке продуктов обогащения. Поэтому в ряде случаев для обогащения угольной мелочи целесообразно использовать водную среду. Исследования, проведенные в ИГД им. А. А. Скочинского [2], и испытания в промышленных условиях показали принципиальную возможность обогащения угольной мелочи крупностью 0—3 мм в водной среде. При определенном режиме представляется возможным получить кондиционный концентрат зольностью около 7% и выделить породу (после обогащения промпродукта) зольностью более 65%.

Разделение частиц угля и породы в гидроциклоне связано с разностью скоростей их перемещения в поле центробежных сил. Если применить для определения скорости радиального перемещения мелких частиц угля и породы равного размера общеизвестную формулу Стокса (с заменой ускорения силы тяжести центробежным ускорением), то отношение этих скоростей будет

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{g_1 (\delta_1 - 1)}{g_2 (\delta_2 - 1)}, \quad (88)$$

где u_1 и u_2 — соответственно скорости перемещения частиц угля и породы;

g_1 и g_2 — центробежные ускорения частиц;

δ_1 и δ_2 — плотности угля и сланца.

В первом приближении можно полагать $g_1 = g_2$; тогда отношение скоростей радиального перемещения частиц

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{\delta_1 - 1}{\delta_2 - 1} \cong 0,16.$$

Таким образом, скорость движения частицы породы под действием центробежной силы в радиальном направлении (от оси к периферии гидроциклона) примерно в семь раз больше, чем угля. Наличие такой значительной разницы в скоростях движения частиц обеспечивает относительно быстрое разделение угля и породы в гидроциклоне в водной среде. При обогащении угля в водной среде в гидро-

циклоне образуется естественная суспензия из частиц обогащаемого материала. Плотность этой суспензии значительно повышается в нижней зоне конуса, вблизи разгрузочной насадки, где концентрируется большое количество сростков и тонких породных частиц. Таким образом, в нижней зоне конуса образуется так называемая естественная «постель», сопротивление которой приходится преодолевать тяжелым зернам, разгружаемым через насадку.

Толщина естественной «постели» определяется расстоянием между отверстием разгрузочной насадки и нижней границей восходящего потока жидкости. Чем больше длина конической части гидроциклона и расстояние между насадкой и нижним концом восходящего потока жидкости, тем выше степень разрыхления естественной «постели» (если не произошло значительного увеличения количества частиц, образовавших «постель», или не повысилась их плотность). Экспериментальным исследованием было установлено, что количество и зольность частиц, вращающихся в нижней зоне конической части гидроциклона, изменяются в зависимости от диаметров разгрузочной насадки, сливной трубки, от давления питания, а также качественной характеристики обогащаемого материала. Изменение угла конусности не оказывает существенного влияния на количество и качество частиц естественной «постели».

Разрыхленность естественной «постели», при прочих равных условиях, изменяется в зависимости от угла конусности гидроциклона. При увеличении угла конусности уменьшается объем, в котором сконцентрированы частицы «постели», вследствие чего повышается плотность упаковки частиц и «постель» становится более плотной. Поэтому для обогащения угля в водной среде целесообразно применять гидроциклон с большим углом конусности. При малых углах в гидроциклоне образуется сильно разрыхленная естественная «постель», сопротивление которой легко преодолевают также сростки и более крупные угольные зерна и разгружаются вместе с породными через отверстие разгрузочной насадки. В данном случае в сливной продукт выносятся только мелкие угольные частицы, выделившиеся в цилиндрической части гидроциклона и в верхних зонах конуса.

В настоящее время на зарубежных углеобогатительных фабриках для обогащения мелкого угля в водной среде применяются гидроциклоны с углом конусности более 90° , а иногда и 135° .

Образование естественной «постели» из частиц вращающихся в нижней зоне конической части, происходит под действием центробежной силы, величина которой определяется давлением у входа в гидроциклон.

При очень низком давлении вся жидкость, вращаясь с небольшой скоростью, опускается вниз и вытекает из гидроциклона через разгрузочную насадку и восходящего потока жидкости в аппарате не образуется. От дальнейшего уменьшения давления уровень жидкости понижается и гидроциклон оказывается ненаполненным.

При давлении выше $0,1-0,2$ *ати* в гидроциклоне образуется внутренний восходящий поток жидкости. С повышением давления длина

этого потока увеличивается, нижняя граница его приближается к отверстию разгрузочной насадки и все большее количество жидкости из внешнего потока вливается в восходящий поток. В случае относительно высоких давлений (2—3 *ати*) нижняя граница внутреннего восходящего потока воды достигает отверстия разгрузочной насадки и вся жидкость выносится из гидроциклона только через сливное отверстие.

Исследованиями с помощью радиоактивных изотопов установлено, что твердые частицы, плотность которых больше плотности среды, при одиночном движении в гидроциклоне опускаются в нижние зоны конической части вместе с нисходящим потоком жидкости. Здесь более мелкие частицы с плотностью, близкой к плотности среды, попадают в восходящий поток и выносятся в слив.

Введением окрашенной жидкости в гидроциклон через отверстие разгрузочной насадки и скоростным фотографированием были определены размеры внутреннего восходящего потока жидкости в гидроциклоне и скорости его движения при различных условиях работы. Эти исследования показали, что длина восходящего потока не является постоянной вследствие изменения расстояния между отверстием разгрузочной насадки и нижней границей восходящего потока в зависимости от условий работы гидроциклона.

Таким образом, повышение давления у входа в гидроциклон, с одной стороны, увеличивает количество минеральных зерен, отброшенных действием центробежной силы в периферийные зоны аппарата и опустившихся вниз к разгрузочной насадке, а с другой — удлиняет внутренний восходящий поток, приближая его нижнюю границу к разгрузочной насадке. Вследствие этого резко повышается плотность естественной «постели» и значительная часть сростков, а также породных зерен, которые образуют «постель», захватывается восходящим потоком и выносится в сливной продукт, повышая зольность угольного концентрата. Но так как «постель» вращается в гидроциклоне и на частицы, находящиеся в ней, действует центробежная сила, то в зоне досягаемости восходящего потока оказываются более легкие частицы, а тяжелые, прижатые центробежной силой к стенке, не попадают в этот поток и выходят из гидроциклона через отверстие разгрузочной насадки. Этим объясняется возможность более эффективного обогащения угля в водной среде при низких давлениях на вводе в гидроциклон.

При обогащении углей в гидроциклонах, работающих при низком давлении, необходимо учитывать действие гидростатического давления, величина которого в нижних зонах больших гидроциклонов, установленных в вертикальном положении, может составить около 20% от давления на входе.

В этих случаях значение имеет также сила тяжести, действие которой было очень незначительным по сравнению с центробежной силой в гидроциклонах, работающих на высоких и средних давлениях.

Гидростатическое давление и сила тяжести способствует накапливанию большого количества материала в нижней зоне гидроциклона и тем самым повышают плотность естественной «постели». Для предотвращения отрицательного действия этих сил приходится увеличивать отверстие разгрузочной насадки, вследствие чего заметно снижается зольность тяжелого продукта обогащения.

Чтобы уменьшить влияние гидростатического давления и силы тяжести на изменение разрыхленности естественной «постели» и иметь возможность использовать разгрузочную насадку с большим отверстием, не допускающим забивания продуктом обогащения, гидроциклоны, работающие на низких давлениях, устанавливают в наклонном положении под углом $10-15^\circ$ к горизонтальной поверхности. При этом значительно уменьшается разность высот между питающим отверстием и разгрузочной насадкой, вследствие чего действие статического давления становится слабым, а сила тяжести оказывает положительное влияние на процесс разделения минеральных зерен по плотности.

Испытания, проведенные в Индии [29], показали, что при обогащении мелкого угля в водной среде в обычном гидроциклоне происходит эффективное разделение частиц размером до $0,066$ мм.

На индийских углеобогащительных фабриках получается значительное количество многозольного шлама. Для обогащения этих шламов в водной среде намечается широкое применение гидроциклонов с большим углом конусности, в которых происходит обогащение по достаточно высокой плотности разделения.

Исследование обогащения угля в водной среде

Исследования по обогащению мелкого угля в водной среде проводились в ИГД им. А. А. Скочинского, а полупромышленные испытания — на обогатительных фабриках.

В лабораторных условиях исследовались угли шахты № 3/5 треста Советскуголь (Донбасс), шахты № 3 Карагандинского бассейна и первичные шламы фабрики Днепродзержинского КХЗ. Кривые обогатимости этих углей показаны на рис. 81, 82, 83. Опыты по обогащению проводились в гидроциклонах диаметром 76 и 100 мм. Давление питания составляло $2,2$ атм.

Установлено, что обогащением угля в водной среде в одну стадию можно получить концентрат с зольностью менее 7%. При этом второй продукт обогащения имеет зольность 30—35% и должен быть либо перечищен, либо использован как энергетическое топливо.

Эффективность обогащения составляет 65—70%. При обогащении в водной среде происходит также снижение содержания серы в концентрате. Степень обессеривания 20—25%.

На рис. 84, 85 и 86 приводятся схемы обогащения угля с перечисткой продуктов первой стадии обогащения в гидроциклонах.

Лабораторные опыты показали, что при двухкратной перечистке нижнего продукта зольность хвостов может быть доведена до 69,24%

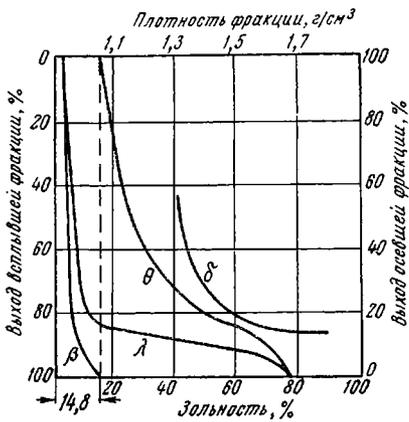


Рис. 81. Кривые обогатимости угля класса 0—3 мм шахты № 3/5 треста Советскуголь:

β — кривая всплывших фракций; λ — элементарная кривая распределения зольности; θ — кривая утонувших фракций; δ — кривая плотностей разделения

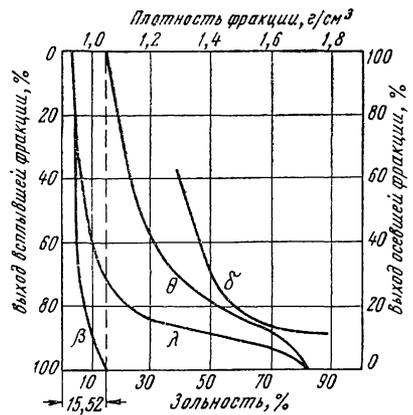


Рис. 82. Кривые обогатимости угля класса 0—3 мм шахты № 3 Карагандинского бассейна:

β — кривая всплывших фракций; λ — элементарная кривая распределения зольности; θ — кривая утонувших фракций; δ — кривая плотностей разделения

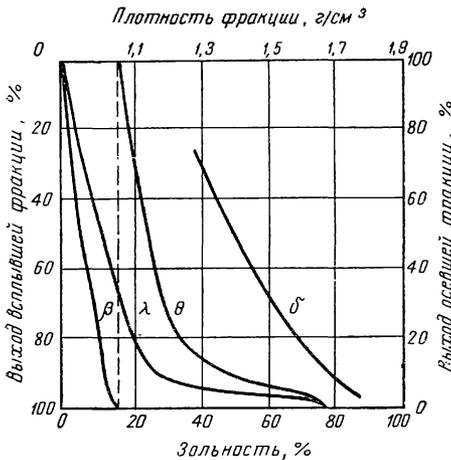


Рис. 83. Кривые обогатимости первичного шлама (класс 0—3 мм) ОФ Днепродзержинского КХЗ:

β — кривая всплывших фракций; λ — элементарная кривая распределения зольности; θ — кривая утонувших фракций; δ — кривая плотностей разделения

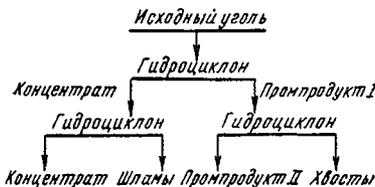


Рис. 84. Схема обогащения угля с перечистой промпродуктов

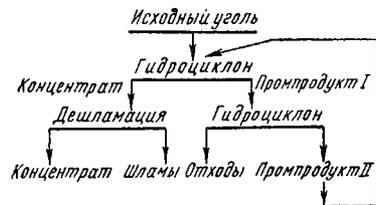


Рис. 85. Схема обогащения угля с возвратом промпродукта в циркуляцию

(табл. 39). Более эффективно обогащается в водной среде класс 0—0,5 мм. При обогащении в одну стадию получены концентрат зольностью 7,6% и остаток, содержащий 50% золы (табл. 40).

Данные, приведенные в табл. 41 и 42, показывают, что в водной среде эффективно обогащается уголь крупностью +0,25 мм. Мелочь —0,15 мм практически не обогащается.

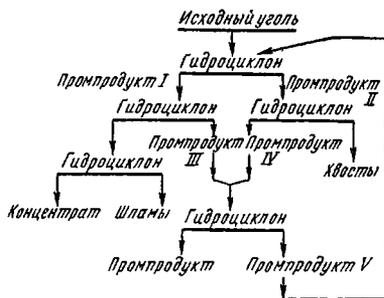


Рис. 86. Схема обогащения угля с двукратной перемывкой промпродукта

Таблица 39
Результаты обогащения угля класса 0—3 мм
в водной среде, %

Количество стадий обогащения	Продукт	Выход	Зольность	Содержание серы
1	Концентрат	67,0	5,90	4,05
	Хвосты	33,0	30,60	8,44
	Исходный	100,0	13,96	5,45
2	Концентрат	58,2	10,06	—
	Промпродукт	14,2	14,75	—
	Хвосты	17,2	56,20	—
	Шламы	10,4	20,66	—
	Исходный	100,0	19,76	—
3	Концентрат	57,7	8,40	—
	Хвосты	10,6	69,24	—
	Шламы	17,0	20,30	—
	Исходный	100,0	20,57	—

Таблица 40
Результаты обогащения угля класса 0—0,5 мм
в водной среде, %

Продукт	Выход	Зольность	Содержание серы	Эффективность обогащения (общая)
Концентрат	67,0	7,50	4,30	81
Хвосты	33,0	49,96	8,70	
Исходный	100,0	24,51	5,80	
Концентрат	73,2	7,62	4,07	71
Хвосты	26,8	50,30	8,47	
Исходный	100,0	19,05	5,44	

**Результаты ситового анализа продуктов обогащения угля
в гидроциклоне**

Класс, мм	Концентрат			Хвосты			Шламовый продукт		
	Выход, %		зольность, %	Выход, %		зольность, %	Выход, %		зольность, %
	от операции	от исходного		от операции	от исходного		от операции	от исходного	
+3	0,90	0,51	4,35	0,06	0,01	—	—	—	—
2—3	3,10	1,74	5,13	0,93	0,07	37,41	—	—	—
1—2	7,56	4,26	4,49	4,02	0,30	45,02	—	—	—
0,5—1	29,91	16,84	4,76	25,32	1,90	51,06	—	—	—
0,25—0,5	40,00	22,52	6,71	36,07	2,70	63,50	—	—	—
0,15—0,25	7,37	4,15	8,98	14,44	1,08	74,93	4,49	1,63	8,78
0,10—0,15	4,36	2,45	10,35	12,93	0,97	75,85	16,93	6,06	12,86
0,074—0,10	1,00	0,56	13,24	2,30	0,17	76,49	11,50	4,23	15,18
—0,74	5,80	3,27	19,78	3,93	0,30	74,62	67,08	24,28	23,23
Итого . . .	100,00	56,30	7,03	100,00	7,50	63,33	100,00	36,20	19,86

Таблица 42

Распределение тонких фракций в продуктах обогащения угля

Класс, мм	Исходный		Концентрат		Хвосты	
	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %
+0,5	24,08	6,89	22,75	4,40	1,33	49,62
0,25—0,5	25,45	10,65	23,56	6,45	1,89	62,81
0,15—0,25	7,47	17,14	6,48	8,18	0,99	75,86
0,10—0,15	8,65	14,34	8,19	10,74	0,46	77,89
0,074—0,1	4,16	14,18	4,04	12,38	0,12	77,52
—0,074	30,19	21,30	29,98	20,95	0,21	70,38
Итого	100,00	13,91	95,00	11,27	5,00	64,00

**Исследование обогащения угля
в водной среде с подачей реагента**

При обогащении мелкого угля в гидроциклоне в водной среде происходит недостаточно эффективное разделение его по заданной плотности.

В ИГД им. А. А. Скочинского был разработан новый метод обогащения мелкого угля в гидроциклонах в водной среде при добавле-

нии реагентов-гидрофобизаторов [3]. Как показали проведенные эксперименты, в присутствии реагентов значительно повышается эффективность процесса обогащения за счет лучшего разделения частиц угля и породы. В жидкой фазе пульпы, подаваемой в гидроциклон под давлением, содержится значительное количество растворенных газов. В гидроциклоне давление резко падает, снижаясь по мере продвижения пульпы к осевой части гидроциклона, при этом в соответствии с законом Генри из жидкости выделяется значительное количество газов. Выделение газов в основном происходит на поверхности твердых частиц и тем значительнее, чем более гидрофобна их поверхность [20].

Пузырьки газов микроскопических размеров возникают в этом случае преимущественно на поверхности угольных частиц ввиду их большой гидрофобности, при этом как бы уменьшается объемный вес частиц угля и увеличивается разность в массе разделяемых компонентов. Вследствие этого возрастает относительное действие потока, который уносит угольные частицы к осевой части гидроциклона, и понижается действие центробежных сил, отбрасывающих их к стенке гидроциклона. Возможно также, что при добавлении реагента-гидрофобизатора к пульпе, подаваемой в гидроциклон, определенную роль играет и образование тонкими частицами угля флоккул и аэрофлокул.

В поле действия центробежных сил, где влияние разницы в массе зерен на скорость их разделения многократно увеличивается, возникновение пузырьков, даже микроскопических размеров, имеет особенно большое значение для разделения зерен угля и породы.

Известно, что воздух в значительном количестве засасывается в гидроциклон через нижнюю насадку. Но это количество воздуха образует «воздушный столб» в осевой части аппарата и не распространяется по всему объему пульпы и не попадает в те зоны гидроциклона, где происходит процесс разделения угольных и породных зерен.

Общая теория процессов минерализации пузырьков воздуха при флотации может быть применена и для случая флотации в гидроциклоне [3, 21].

Выделение растворенного газа в виде пузырьков происходит более интенсивно на менее гидратированных поверхностях угольных зерен. Эти пузырьки образуют вместе с твердыми частицами комплексы «уголь — пузырьки», которые выносятся потоком жидкости через сливное отверстие в концентрат.

В гидроциклоне имеются особые условия для возникновения и закрепления пузырьков воздуха на минералах. Эти особые условия состоят в том, что при наличии ускоренного движения пульпа, вращаясь, перемещается в осевом и радиальном направлениях. Некоторые твердые частицы, будучи увлечены радиальным потоком жидкости, на каком-то расстоянии от периферии гидроциклона могут изменить свое направление под действием возросшей центробежной силы и двигаться обратно к периферии. Однако, попав в зоны

с меньшими скоростями вращения, эти частицы под превосходящим действием потока жидкости могут снова изменить направление своего движения. Некоторые частицы подобным образом циркулируют в гидроциклоне довольно продолжительное время. Надо полагать, что с подачей реагента в гидроциклон происходит флотация и тех угольных частиц или сростков, находящихся в циркуляции, которые не в состоянии достигнуть без помощи воздушных пузырьков границ внутреннего потока жидкости.

Для того чтобы в гидроциклоне осуществилось образование пузырька газа на минеральной частице, краевой угол смачивания должен быть достаточно большим.

Увеличение крупности частиц и возрастание отрывающих сил требуют увеличения краевого угла смачивания в условиях флотации в гидроциклоне. Роль пузырьков, выделившихся из раствора, в гидроциклоне более важна, чем во флотационной машине. Выделение пузырьков в гидроциклоне происходит из всей массы пульпы, находящейся в нем, и в большем количестве вследствие более значительного перепада давления, чем во флотационной машине. Скорость всплывания воздушных пузырьков является важным фактором при флотации. Роль мелких пузырьков воздуха во флотационной машине значительно снижается за счет небольшой скорости всплывания их. В гидроциклоне вообще не происходит всплывания пузырьков, так как сила тяжести здесь не имеет значения, поэтому они уносятся потоком жидкости к осевой части и выносятся через сливное отверстие. Это отличие также повышает роль в гидроциклоне мелких пузырьков воздуха, выделившихся из раствора.

При подаче в гидроциклон воды центробежным насосом, обычно под давлением 0,5—3 *атм*, происходит растворение газов (воздуха), попадающих в насос с питанием. Количество растворенного газа, по закону Генри, пропорционально давлению и определяется для идеальных жидкостей следующей формулой:

$$C = kr, \quad (89)$$

где C — концентрация газа в растворе;

k — коэффициент пропорциональности, характеризующий растворимость газа и зависящий от температуры;

r — давление газа над раствором.

При входе воды в гидроциклон происходит резкое падение давления, вследствие чего выделяется значительная часть растворенных газов.

Вода, вращаясь с большой скоростью, движется вместе с выделившимися пузырьками газов по спирали в направлении к оси гидроциклона. При этом понижение давления во всем объеме гидроциклона происходит неравномерно (в зависимости от радиуса вращения жидкости).

Наклон кривых давления несколько изменяется в цилиндрической и конической частях гидроциклона.

Движение воды происходит таким образом, что она на некотором радиусе вращения поднимается, затем опускается, т. е. имеет место волнообразное движение. Надо полагать, что в таких условиях выделение растворенного воздуха в воде при ее движении от периферии гидроциклона к осевой части происходит также неравномерно. В одних точках выделяется больше воздуха, чем в других, а в некоторых точках имеет место не выделение, а, наоборот, растворение мельчайших воздушных пузырьков.

Таким образом, в гидроциклоне образуется воздушная эмульсия с неравномерной концентрацией пузырьков как по количеству, так и по дисперсности.

Выделение растворенных газов из воды в гидроциклоне

Для того чтобы иметь представление о характере выделения воздуха из раствора, достаточно было бы определить количество газа, оставшегося в растворенном виде в различных точках гидроциклона. Но непосредственное измерение перепадов концентраций растворенного воздуха в отдельных точках гидроциклона, характеризующих выделение воздуха из раствора, технически затруднено. Поэтому обычно в таких случаях измеряется концентрация кислорода, а затем в случае необходимости делается перерасчет с учетом растворимости газов, входящих в состав воздуха.

Определение содержания кислорода в воде или в водном растворе обычно производится химическими методами, к которым относятся следующие: эвакуационный, пирогалловый Уайта, гидросульфидный и йодометрический.

Наиболее точным, достаточно освоенным и применяемым в ИГД им. А. А. Скочинского является йодометрический способ определения кислорода, который основан на связывании кислорода, находящегося в растворе, гидратом закиси марганца. Однако применение химических методов определения кислорода в гидроциклоне сопряжено со многими техническими трудностями. Основной из них является практическая невозможность сохранить постоянными важнейшие условия, определяющие растворимость газов, во время отбора проб и при производстве анализа.

Наиболее удобным и точным является метод, позволяющий производить непосредственные измерения концентрации кислорода в интересующей нас точке жидкости в процессе работы гидроциклона.

Электрохимические свойства кислорода позволяют применить следующий метод. Кислород, выделившийся на электроде, создает потенциал поляризации, возрастающий с накоплением (увеличением концентрации) кислорода [18]. Если соединить с внешним источником тока два электрода, один из которых является неполяризуемым, и опустить их в воду, то возникает предельный ток, который при определенных условиях пропорционален концентрации растворенного кислорода.

Кислород легко восстанавливается на электроде и дает хорошо выраженную волну [22]. Этим свойством пользуются для определения кислорода в технических газах.

При применении платинного микроэлектрода возможно достигнуть потенциала, при котором происходит выделение кислорода как при анодной, так и при катодной поляризации. Таким образом, сняв поляризационные кривые (сила тока — напряжение), можно на этой основе определить относительную концентрацию кислорода в различных точках воды в гидроциклоне. Для снятия поляризационных кривых применяется полярграф Гейровского, в котором поляризующимся является капельный ртутный электрод [16]. Однако ртутный капельный электрод может функционировать только в спо-

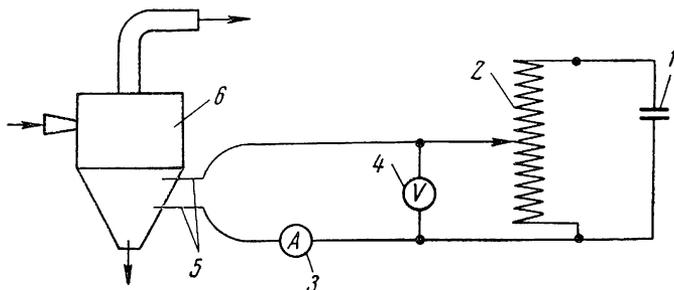


Рис. 87. Электрическая схема для определения концентрации кислорода в гидроциклоне:

1 — батарея постоянного тока напряжением 1,3 в; 2 — реостат; 3 — микроамперметр; 4 — милливольметр; 5 — электроды; 6 — гидроциклон

койной жидкости. Этим и объясняется невозможность применения полярографа для измерения концентрации растворенного кислорода в гидроциклоне. Поляризационные кривые можно снимать вольт-амперометрическим методом, который был разработан В. И. Класенем для измерения концентрации растворенного кислорода во флотационной машине [21].

Сущность этого метода заключается в том, что измеряется сила тока при различных напряжениях и получают данные для вычерчивания поляризационных кривых. На основании этих данных и по поляризационным кривым определяется катодное или анодное напряжение поляризации, при котором производится измерение силы предельного тока.

Для определения концентрации кислорода этим способом была принята электрическая схема, показанная на рис. 87. Поляризующимся электродом служил платиновый микроэлектрод из проволоки диаметром 0,8 мм и длиной 2 мм, а неполяризующимся — пластинчатый платиновый электрод общей площадью 2 см² или корпус гидроциклона из железа. При большой разнице в площадях электродов плотность тока недостаточна для поляризации лишь микроэлектрода. Возникновение предельного тока объясняется тем, что

на микроэлектроде устанавливается некоторое предельное состояние концентрационной поляризации. В результате разряжения растворенного кислорода концентрация его вблизи микроэлектрода снижается, и эта убыль должна компенсироваться диффузией свежего кислорода из остальной массы воды.

В случае диффузии процесс поляризации продолжителен, поэтому для его ускорения применяется вращающийся микроэлектрод. Иногда по этим же соображениям электролиз проводится не в спокойном растворе, а при сильном перемешивании его, чем достигается быстрый подвод реагирующих с электродом веществ [28].

Известно, что для получения воспроизводимых результатов в качестве микроэлектрода применяется платиновая проволока диаметром не более 1 мм.

Применение микроэлектрода в условиях гидроциклона удобно тем, что он, имея сравнительно малые размеры, незначительно влияет на гидродинамические условия. В гидроциклоне, где жидкость вращается с большой скоростью, нет необходимости применять вращающийся микроэлектрод, так как в этом случае достаточную точность измерения можно получить и с неподвижным электродом.

На растворение кислорода в воде существенное влияние оказывает температура. Растворимость газов, как правило, уменьшается с повышением температуры среды. Это явление связано с тем, что растворение газов сопровождается выделением теплоты сольватации их молекул. При давлении 1 *ати* растворимость кислорода в воде с повышением температуры от 0 до 20° уменьшается в 3 раза и от 20 до 40° — в 1,3 раза.

При исследованиях приняты необходимые меры, предотвращающие значительные изменения температуры воды в процессе снятия поляризационных кривых и измерений концентрации кислорода.

Опыты по определению концентрации растворенных в воде газов проводились на лабораторной установке гидроциклона (см. рис. 19), изготовленного из оргстекла, диаметром 80 мм, с углом конусности 20° и в железном гидроциклоне с углом конусности 15°.

Вода подавалась в гидроциклон центробежным насосом под давлением 1,2 *ати*, которое измерялось манометром, установленным на расстоянии 200 мм от входа в гидроциклон. При помощи крана, установленного на трубопроводе после насоса, часть воды направлялась непосредственно в зумпф (перед насосом), и таким образом регулировалось давление на входе.

Слив гидроциклона поступал в бак, затем из него в зумпф перед насосом, куда поступала также вода, выходящая через насадку. Температура воды в течение одного опыта изменялась на 1—1,5° С. При каждом опыте применялась свежая вода.

На стенке гидроциклона в цилиндрической и конической частях имелись отверстия, в которые вставлялись электроды. Свободные от электродов отверстия закрывались пробками из оргстекла.

Опыты проводились следующим образом: вначале снимались поляризационные кривые с помощью электрода, располагаемого

в точках на разных горизонтальных уровнях и различных радиусах. При этих условиях определялось напряжение поляризации. Затем при этом напряжении поляризации измерялась сила тока в указанных точках. Предварительные опыты показали, что напряжение поляризации, а также сила тока, измеряемая при данном напряжении, не зависят от положения неполяризующегося электрода. В начальной стадии экспериментов снимались кривые катодной поляризации, при этом в качестве неполяризующегося электрода (анода) служил корпус гидроциклона из оцинкованного или белого железа.

Для того чтобы измерить силу тока, характеризующую концентрацию растворенного кислорода в различных точках, необходимо определить величину напряжения катодной поляризации в соответствующих точках. С этой целью проведены опыты, результаты которых приведены в табл. 43. Кривые поляризации показаны на рис. 88. Установлено, что на меньших радиусах поляризация может происходить при меньших напряжениях, чем на больших радиусах.

Таблица 43

Величины катодной поляризации воды в различных точках гидроциклона (диаметр гидроциклона 80 мм, диаметр сливного отверстия 20 мм, диаметр насадки 15 мм, угол конусности 15°, давление питания 0,7 атм, температура воды 19° С, неполяризующийся анод—железо)

Напряжение, в	Сила тока, мка			
	Радиус измерения, мм			
	15	20	25	30
0	1,10	1,10	1,10	1,10
0,05	1,15	1,15	1,12	1,15
0,10	1,20	1,25	1,15	1,23
0,15	1,20	1,30	1,20	1,28
0,20	1,20	1,30	1,25	1,30
0,25	1,20	1,30	1,30	1,35
0,30	1,20	1,30	1,40	1,38
0,35	1,20	1,30	1,45	1,40
0,40	1,30	1,35	1,45	1,55
0,45	1,40	1,40	1,45	1,55
0,50	1,50	1,50	1,45	1,55
0,60	2,10	2,20	1,50	1,65
0,70	3,70	3,80	1,60	2,35
0,80	5,90	6,40	2,00	4,05
0,90	8,80	9,60	2,60	6,05
1,00	13,10	—	4,50	8,35

Примечание. На радиусе 30 мм катодная поляризация началась при напряжении 0,4 в.

Например, величина катодной поляризации при радиусе 15 мм составляет 0,1—0,35 в, в то время как при радиусе 25 мм она равна 0,35—0,50 в.

Для сравнения концентрации кислорода в спокойной воде в гидроциклоне и во время его работы были проведены измерения, по результатам которых построены кривые поляризации (рис. 89). Эти опыты показали, что вода в работающем гидроциклоне содержит большее количество растворенного кислорода, чем в неработающем.

Необходимо было проверить, действительно ли поляризация электрода происходит за счет растворенного кислорода. Для выяснения этого вопроса в гидроциклон подавался кислород. Поляризационные кривые снимались до и после подачи кислорода (рис. 90). При подаче кислорода повышаются величины напряжения и силы тока, при которых происходит поляризация.

Далее были проведены измерения концентрации растворенного газа во время подачи в гидроциклон кислорода и после вытеснения его азотом.

На основании проведенных измерений было установлено, что именно растворенный в воде кислород поляризует электрод.

Опытным путем установлено, что предельный ток в гидроциклоне пропорционален количеству растворенного кислорода. Зная количество кислорода, введенного дополнительно из баллона в гидроциклон, и предположив, что всё это количество растворилось в воде, нетрудно найти, какому количеству растворенного кислорода соответствует каждая единица предельного тока. В данном случае 1 мка силы тока соответствует 90 мг/л кислорода в растворе.

Платиновый микроэлектрод можно применять также в качестве анода вплоть до достижения потенциала, при котором происходит выделение кислорода [23]. Опыты показали, что изменение концентрации кислорода в различных точках гидроциклона, измеренное катодной и анодной поляризацией, имеет одинаковый характер. Более точная воспроизводимость результатов измерения имеет место при анодной поляризации с применением в качестве неполяризуемого электрода платиновой пластинки.

Экспериментальное исследование показало, что в гидроциклоне из раствора выделяется значительное количество газов. Степень выделения газов в различных точках внутри гидроциклона не одинакова. Кривые изменения силы тока в зависимости от концентрации

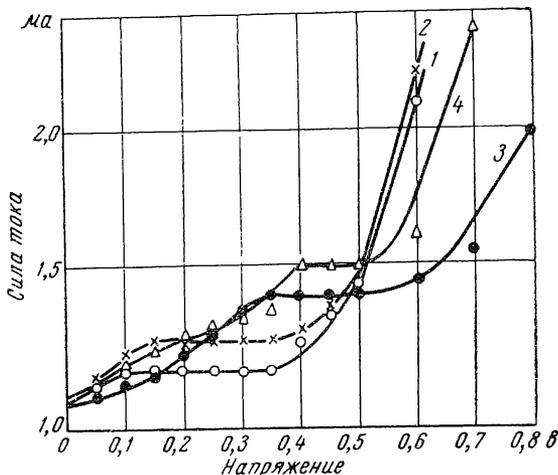


Рис. 88. Кривые катодной поляризации на различных радиусах гидроциклона:

1 — на радиусе 15 мм; 2 — то же, 20 мм; 3 — то же, 25 мм; 4 — то же, 30 мм

кислорода в различных точках (рис. 91) показывают, что при входе жидкости в гидроциклон вследствие уменьшения давления сразу происходит выделение газов. Растворенного кислорода в воде перед входом в гидроциклон в 2,5 раза больше, чем внутри гидроциклона, у стенки его цилиндрической части (рис. 92).

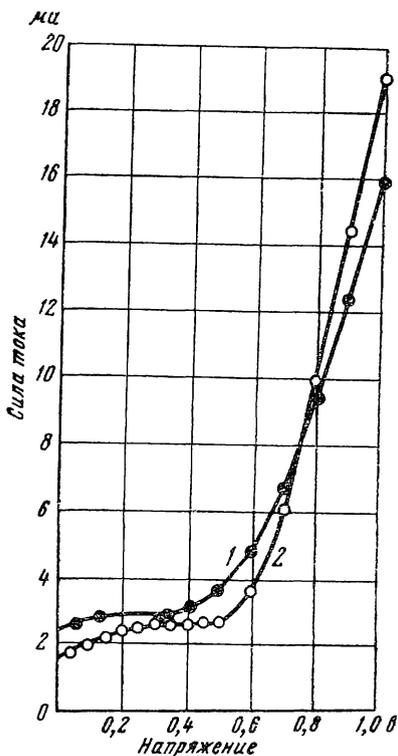


Рис. 89. Кривые катодной поляризации:

1 — при работе гидроциклона; 2 — в спокойной воде

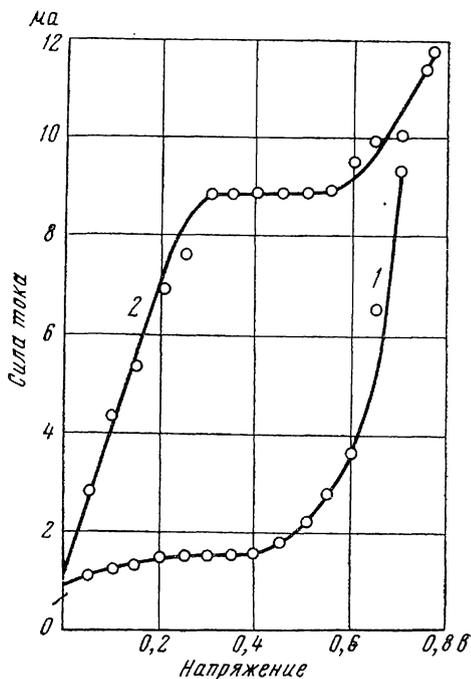


Рис. 90. Поляризационные кривые до подачи в гидроциклон кислорода (1) и при подаче его (2)

Количество газов в гидроциклоне несколько увеличивается в верхних зонах, но их все же значительно меньше (в 1,4 раза), чем перед входом в гидроциклон.

Анализ характера изменения концентрации кислорода в различных зонах по высоте гидроциклона показывает следующее. В цилиндрической части на уровне выше конца сливной трубки происходит значительное выделение газов из воды у стенки гидроциклона, поэтому концентрация растворенного кислорода заметно уменьшается. С незначительным уменьшением радиуса концентрация кислорода несколько увеличивается. При дальнейшем уменьшении радиуса происходит выделение газов и уменьшение концентрации кислорода, которое с некоторыми колебаниями продолжается до радиуса 25 мм. Начиная с этой точки, концентрация кислорода резко и непрерывно

увеличивается, достигая максимального значения у внешней стенки сливной трубки. Как показали экспериментальные исследования,

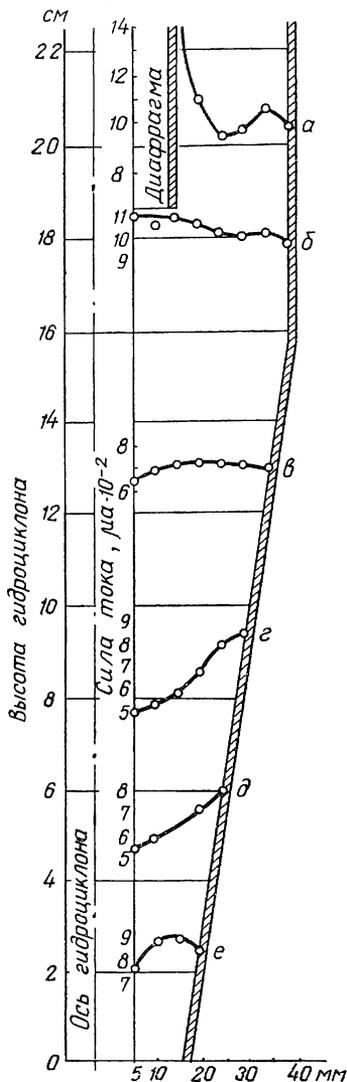


Рис. 91. Кривые изменения силы тока в различных точках гидроциклона в зависимости от концентрации кислорода

вертикальная составляющая скорости жидкости в цилиндрической части имеет максимальное значение у стенки гидроциклона и направлена вниз. По мере уменьшения радиуса эта скорость уменьшается и на некотором радиусе становится равной нулю. После этого вертикальная скорость направлена вверх, и ее величина непрерывно увеличивается обратно пропорционально радиусу.

Таким образом, жидкость в верхней зоне цилиндрической части гид-

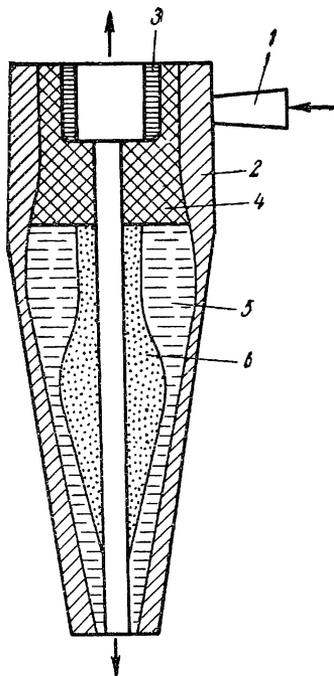


Рис. 92. Зоны различной концентрации растворенных в воде газов в гидроциклоне:

1 — 44 мг/л; 2 — 18 мг/л; 3 — 30 мг/л; 4 — 22 мг/л; 5 — 14 мг/л; 6 — 11 мг/л

роциклона сначала течет вниз, потом, меняя направление, поднимается вверх, доходит до сливной трубки и, делая круговорот, идет в циркуляцию. В процессе циркуляции образуются вихри, внешние линии которых местами доходят до стенки гидроциклона.

Не исключена возможность, что мельчайшие пузырьки, образовавшиеся из выделенных газов, снова растворяются в жидкости, что дает увеличение концентрации кислорода. Вероятно, в этой зоне происходит частичная концентрация пузырьков газов, всплывших из нижних зон. Эта зона гидроциклона является весьма важной с точки зрения технологического процесса разделения при обогащении угля. Здесь значительное количество породных зерен по внешней поверхности сливной трубки сползает вниз по так называемому короткому циклу потока и выносятся в концентрат, тогда как более легкие угольные зерна с потоком жидкости поднимаются вверх и идут в циркуляцию. Следует ожидать, что минерализованные пузырьки, так же как и угольные зерна, в этой зоне будут увлечены потоком жидкости и пойдут в циркуляцию вместо того, чтобы выноситься в концентрат, как это наблюдается в других зонах гидроциклона.

Таким образом, в цилиндрической части циклона в зонах, лежащих выше конца сливной трубки, наличие воздушных пузырьков не улучшает, а, наоборот, ухудшает процесс разделения угля и снижает эффективность обогащения. С этой точки зрения весьма благоприятным является то, что здесь и особенно в непосредственной близости от внешней поверхности сливной трубки происходят растворение воздуха в жидкости и уменьшение количества пузырьков.

В зоне, лежащей ниже сливной трубки, но находящейся в непосредственной близости от ее конца, кривая концентрации кислорода имеет несколько иной вид. Здесь также происходят значительное выделение газов у стенки гидроциклона и увеличение концентрации растворенного кислорода по мере удаления струи воды от стенки. Но это увеличение происходит значительно медленнее и на большем расстоянии, чем в вышележащих слоях. На некотором расстоянии от стенки гидроциклона концентрация кислорода снова уменьшается. При приближении жидкости к сливной трубке наблюдается некоторое увеличение количества растворенных газов в ней, но в непосредственной близости от трубки снова начинается уменьшение, которое продолжается до самой оси гидроциклона. В верхней зоне конической части гидроциклона значительное выделение газов происходит также у стенки. При дальнейшем движении жидкости в направлении к осевой зоне выделение газов почти отсутствует и только в непосредственной близости от воздушного столба наблюдается заметное выделение.

Совершенно другой характер имеют кривые концентрации кислорода в средних зонах конической части гидроциклона. В этой зоне (z и d), так же как и в других зонах (a , b , v , e), выделение воздуха начинается у стенки гидроциклона (см. рис. 91). Оно продолжается непрерывно при уменьшении радиуса до самой границы воздушного столба. В этой зоне изменение давления и концентрация растворенного кислорода имеют приблизительно одинаковый характер (см. рис. 21 и 91).

Наконец, в нижней части конуса вблизи отверстия насадки, имеет место волнообразный характер изменения кривой концентрации кислорода.

Количество растворенного газа непрерывно увеличивается с уменьшением радиуса и только в зоне воздушного столба оно снова начинает уменьшаться. По-видимому, в этой зоне происходит частичное растворение воздуха, который засасывается через насадку. Здесь характер движения жидкости несколько иной, чем в вышележащих зонах конической части. Не вся жидкость, пришедшая сюда из внешнего потока, успевает уйти через отверстие насадки. Поэтому вблизи отверстия насадки происходит некоторая задержка и изменение направления движения жидкости. Очевидно, здесь будет иметь место образование микровихрей, которые способствуют растворению воздушных пузырьков.

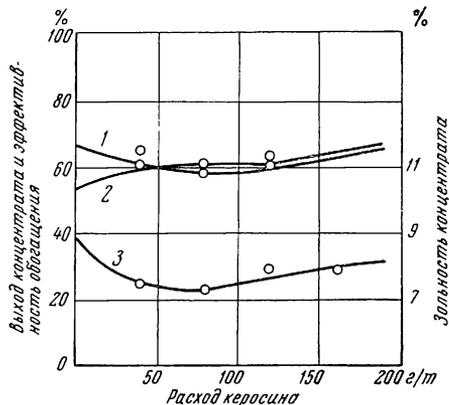
Экспериментальное исследование показывает, что существует интенсивное выделение растворенных газов из воды в гидроциклоне, которое имеет важное значение при обогащении угля с применением реагентов. При этом самое сильное выделение газов наблюдается в конической части гидроциклона, в особенности в ее средней зоне, где главным образом и происходит процесс разделения угольных и породных зерен.

Расход реагента-гидрофобизатора

Для определения оптимального расхода реагента-гидрофобизатора (керосина) в лабораторных условиях проводились исследования по обогащению различных углей крупностью 0—3 мм (табл. 44).

Рис. 93. Влияние расхода керосина на эффективность обогащения:

1 — выход концентрата; 2 — эффективность обогащения; 3 — зольность концентрата



На рис. 93 показано влияние расхода керосина на эффективность обогащения.

Исследованиями установлено, что эффективность обогащения мелкого угля (0—3 мм) в водной среде значительно повышается с подачей небольшого количества реагента-гидрофобизатора (керосина).

Результаты обогащения угля при различном расходе керосина (диаметр гидроциклона 100 мм, диаметр сливного отверстия 70 мм, высота трубки 60 мм, диаметр насадки 18 мм, угол конусности 45°, давление питания 1,5 атм, положение гидроциклона—горизонтальное)

Расход керосина, г/т	Продукт	Выход, %	Зольность, %	Эффективность обогащения (общая), %
0	Концентрат	75,4	8,8	63
	Шламы	3,8	43,2	
	Остаток	20,8	34,3	
	Исходный	100,0	15,5	
40	Концентрат	70,1	7,5	75
	Шламы	11,5	29,2	
	Остаток	18,4	40,1	
	Исходный	100,0	16,0	
80	Концентрат	68,9	7,3	71
	Шламы	10,8	24,3	
	Остаток	20,3	34,0	
	Исходный	100,0	14,5	
120	Концентрат	72,6	7,9	70
	Шламы	7,4	30,2	
	Остаток	20,0	33,7	
	Исходный	100,0	14,7	
160	Концентрат	72,8	7,9	74
	Шламы	7,5	33,1	
	Остаток	19,7	40,5	
	Исходный	100,0	16,2	
200	Концентрат	76,0	6,9	80
	Шламы	8,1	31,4	
	Остаток	15,9	42,8	
	Исходный	100,0	14,6	

О влиянии воздуха, подаваемого в гидроциклон, на эффективность обогащения угля с применением реагентов

Основной процесс разделения угольных и породных зерен в гидроциклоне при обогащении углей с применением реагентов-гидрофобизаторов происходит под действием центробежной силы, а своеобразная флотация является вспомогательным процессом. Применение реагента-гидрофобизатора позволяет повысить эффективность обогащения углей на 8—10%. Выше отмечалось, что в гидроциклоне происходит выделение растворенных газов из воды, однако не было установлено, достаточно ли количество этих газов для флотации или необходимо вводить еще дополнительный воздух. В связи

с этим дополнительно исследовалось влияние воздуха, подаваемого в гидроциклон, на процесс флотации в поле центробежной силы. Испытания проводились в гидроциклоне диаметром 76 мм, имеющем двойные стенки, между которыми образовывалась камера давления для подвода воздуха. Воздух подавался в различные области гидроциклона: в цилиндрическую и коническую части и в питающий патрубок. В коническую часть воздух подавался через отверстия во внутренней стенке гидроциклона.

Результаты обогащения угля с подачей в гидроциклон воздуха приведены в табл. 45 и 46. Установлено, что дополнительный воздух, введенный в различные области гидроциклона, не оказывает положительного влияния на процесс обогащения угля в водной среде (с применением реагента-гидрофобизатора). Для этого метода обогащения угля количество газов, выделяемых из воды в гидроциклоне, является достаточным.

Таблица 45

Результаты обогащения угля без подачи и с подачей воздуха
в гидроциклон

Место подачи воздуха	Количество воздуха, л/мин	Продукт	Выход, %	Зольность, %
Цилиндрическая часть	0	Концентрат	63,7	7,42
		Остаток	23,7	48,22
		Шламы	12,6	33,33
		Исходный	100,0	20,36
	4	Концентрат	60,6	7,93
		Остаток	25,7	46,80
		Шламы	13,7	34,08
		Исходный	100,0	21,53
	10	Концентрат	49,7	6,43
		Остаток	37,7	37,18
		Шламы	12,6	31,50
		Исходный	100,0	21,19
Коническая часть (перпендикулярно образующей конуса)	2	Концентрат	47,5	6,63
		Остаток	39,5	31,26
		Шламы	13,0	28,96
		Исходный	100,0	19,26
	4	Концентрат	41,3	7,57
		Остаток	46,2	33,33
		Шламы	12,5	28,72
		Исходный	100,0	20,92
	10	Концентрат	25,8	6,24
		Остаток	62,0	23,37
		Шламы	12,2	21,47
		Исходный	100,0	19,72

Место подачи воздуха	Количество воздуха, л/мин	Продукт	Выход, %	Зольность, %
Коническая часть (тангенциально образующей конуса)	2	Концентрат	54,2	7,23
		Остаток	34,6	38,69
		Шламы	11,2	25,90
		Исходный	100,0	20,21
	4	Концентрат	55,3	7,81
		Остаток	35,3	34,16
		Шламы	9,4	30,00
		Исходный	100,0	19,30
	10	Концентрат	37,1	7,62
		Остаток	50,9	25,89
		Шламы	12,0	25,17
		Исходный	100,0	19,03

Таблица 46

Результаты обогащения угля с подачей воздуха в питающий патрубок гидроциклона

Количество воздуха, л/мин	Давление питания, ати	Продукт	Выход, %	Зольность, %
0	1,5	Концентрат	55,9	5,90
		Остаток	33,3	26,12
		Шламы	10,8	27,60
		Исходный	100,0	14,98
3,6	1,8	Концентрат	61,2	6,45
		Остаток	22,0	30,80
		Шламы	16,8	20,20
		Исходный	100,0	14,12

Испытание гидроциклонов по обогащению мелкого угля на обогатительных фабриках

На обогатительной фабрике Днепродзержинского коксохимического завода были проведены промышленные испытания обогащения углей в гидроциклонах. Угольные шламы крупностью 0—3 мм обогащались в гидроциклоне диаметром 400 мм.

Схема установки гидроциклона показана на рис. 94. Первичные шламы из радиальных отстойников поступали в контактный чаш емкостью 3,2 м³, откуда насосом подавались по трубопроводу в гидроциклон. Давление питания гидроциклона измерялось манометром, установленным на расстоянии 350 мм от него, и составляло 2—2,5 ати. Гидроциклон установлен под углом 15° к горизонту. Верх-

ний продукт гидроциклона из сливной трубки поступал в делитель, где происходило отделение небольшой его части для отбора пробы, а остальное количество направлялось в отстойник концентрата. Нижний продукт гидроциклона разгружался в приемник, затем поступал в сборник хвостов. При помощи вентиля изменялось количество шламов, поступающих в гидроциклон. Реагент подавался скиповым питателем.

На испытание поступали шламы, полученные при обезвоживании концентратов крупной и мелкой отсадки. Выход шламов составлял 13—15% от рядового угля. На фабрике эти шламы обогащаются на двух шламовых беспоршневых отсадочных машинах, в результате чего получается концентрат зольностью 12,5—14,0%.

После обезвоживания концентрата на грохотах с отверстиями сита 0,5 мм зольность его снижается до 8% при выходе 40—47%. Зольность хвостов отсадки составляет 50—56% при выходе 8—9%. Результаты ситового анализа исходных шламов приводятся в табл. 47, а на рис. 83 показаны кривые обогатимости.

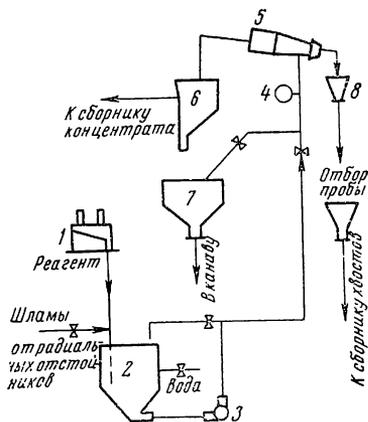


Рис. 94. Схема установки гидроциклона промышленных опытов:

1 — скиповый питатель реагента; 2 — контактный чан; 3 — насос; 4 — манометр; 5 — гидроциклон; 6 — делитель; 7, 8 — приемные воронки

Таблица 47

Результаты ситового анализа шлама фабрики Днепродзержинского КХЗ

Класс, мм	Выход	Зольность	Выход	Зольность	Выход	Зольность
	от класса, %		суммарные, %			
			сверху		снизу	
+3	2.2	6.31	2.2	6.31	100.0	15.26
2-3	4.2	8.00	6.4	7.00	97.8	15.46
1-2	12.5	8.85	18.9	8.20	93.6	15.79
0.5-1	20.9	10.95	39.8	9.60	81.1	16.86
0.25-0.5	16.3	17.85	56.1	10.10	60.2	19.04
1,18-0,25	8.8	19.65	64.9	11.00	43.9	19.49
-0,18	35.1	19.44	100.0	13.96	35.1	19.44
Итого	100,0	15,33	—	—	—	—

Результаты обогащения шламов 0—3 мм в гидроциклоне ИГД-400

Реагент	Расход реагента, г/т	Концентрат			Промпродукт			Исходный	
		выход, %	зольность, %	извлечение, %	выход, %	зольность, %	извлечение, %	выход, %	зольность, %
Керосин	0	53,6	11,8	57,1	46,4	23,40	42,9	100,0	17,18
		59,9	11,3	64,2	40,1	25,96	35,8	100,0	17,18
	50	62,5	11,8	66,6	37,5	26,12	33,2	100,0	17,18
58,8		12,1	62,4	41,2	24,44	37,6	100,0	17,18	
61,2		12,1	65,0	38,8	25,20	35,0	100,0	17,18	
Поглотительное масло	250	62,0	11,5	66,1	38,0	25,82	33,9	100,0	16,94
		75,0	12,9	78,6	25,0	29,04	21,4	100,0	16,94

Результаты обогащения шламов 0—3 мм приведены в табл. 48.

Установлено, что с подачей реагента происходит увеличение выхода концентрата на 8—10% без заметного изменения зольности. Например, если выход концентрата зольностью около 12% составлял 54%, то после подачи реагента (керосин или поглотительное масло) повысился до 62%. Однако при одностадийном обогащении шламов в гидроциклоне как без реагента, так и с его применением, наряду с концентратом получается промежуточный продукт (нижний продукт гидроциклона) с зольностью не выше 35%. Результаты ситового анализа (табл. 49) показывают, что до обезвоживания в концентрате содержалось примерно 48% илов крупностью —0,25 мм и более 40% крупностью —0,15 мм при зольности 20—21%. Следовательно, зольность концентрата после обезвоживания составит около 7% при выходе 40—45%.

Таблица 49

Результаты ситового анализа концентрата

Класс, мм	Выход, %	Зольность, %
+0,25	51,6	4,03
—0,25	48,4	20,50
Итого	100,0	12,00
+0,15	56,9	5,38
—0,15	43,1	20,75
Итого	100,0	12,00

На ЦОФ «Комсомолец» (Донбасс) было проведено испытание гидроциклона диаметром 300 мм (ИГД-300) для обогащения первич-

ного шлама в водной среде с применением реагента-гидрофобизатора. Схема установки гидроциклона ИГД-300, изготовленного по чертежам ИГД им. А. А. Скочинского на Моспинском ремонтно-механическом заводе, показана на рис. 95. Отличительной особенностью этого гидроциклона является наличие клапана, с помощью которого можно изменять размеры сливного отверстия, не прибегая к замене сливной трубки. Диаметр гидроциклона в цилиндрической части 300 мм, угол конусности 45 и 60°. Входное отверстие имеет форму эллипса с осями 62 × 105 мм. Гидроциклон был установлен наклонно, под углом около 15°.

Первичные шламы из пирамидальных сгустителей подавались тангенциально в сгустительную воронку 1 (диаметром 3 м и высотой 2,5 м) через отверстие на высоте $\frac{2}{3}$ от вершины. Сгущенная часть шламов поступала на шламовую отсадочную машину через нижнее отверстие у вершины воронки, а слив — на флотацию. На той же высоте, на которой вводились первичные шламы, через отверстие в воронке часть материала самотеком поступала в контактный чан 2 диаметром 3 м и высотой 1,5 м, откуда перекачивалась насосом 4 в гидроциклон 5. К контактному чану была также подведена свежая вода для регулирования плотности шламов, поступающих в гидроциклон.

Реагенты подавались в чан при помощи питателя 3 скипового типа.

Давление питания измерялось манометром 6, установленным на шламопроводе на расстоянии 240 мм от гидроциклона. В период испытания гидроциклона на ЦОФ «Комсомолец» поступали угли из шахт «Комсомолец», № 11-бис и 19—20 треста Горловского, а также № 17—17-бис треста Рутченковуголь. Угли относились к средне- и легкообогатимым, но содержали значительное количество мелочи. Выход класса 0—3 мм доходил до 55%. Классы 10—50 и 0,5—10 мм обогащались на двухкамерных поршневых отсадочных машинах. Первичные шламы, полученные при обезвоживании концентратов отсадочных машин, обогащались на двухступенчатой шламовой отсадочной машине поршневого типа. Перед отсадкой шламы сгущались в центробежной воронке, где происходило выделение тонких шламов, идущих на флотацию. Шламовая отсадочная машина выдавала концентрат с зольностью 7% (после обезвоживания на грохотах с ситом 0,5 мм) и промпродукт с зольностью 30%, который поступал на перечистку в отсадочную машину для мелкого

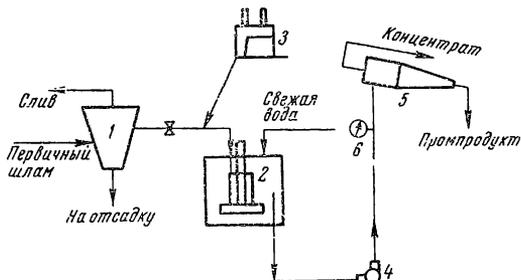


Рис. 95. Схема установки гидроциклона ИГД-300:

1 — сгустительная воронка; 2 — контактный чан; 3 — скиповый питатель реагента; 4 — насос; 5 — гидроциклон; 6 — манометр

угля. Мелочь (тонкий шлам), выделенная из концентрата шламовой отсадочной машины, направлялась на флотацию.

Результаты ситового анализа первичных шламов приведены в табл. 50. Они показывают, что в шламах содержится более 40% класса 0,5—1 мм, который трудно обогащается гравитационными методами, а также более 40% частиц тонких фракций —0,5 мм с зольностью 25%, эффективность обогащения которых как в гидроциклоне, так и на отсадочной машине является весьма невысокой.

Таблица 50

Гранулометрическая характеристика первичного шлама
ЦОФ «Комсомолец»

Крупность, мм	Выход, %	Зольность, %
+3	1,6	7,2
1—3	16,1	7,6
0,5—1	40,8	10,5
0—0,5	41,5	25,1
Итого	100,0	16,0

Анализ продуктов обогащения шламовой отсадочной машины показывает, что в промпродукте и хвостах более половины материала составляет класс 0—0,5 мм с зольностью до 32—34% (против 25% в исходном шламе). При обогащении первичных шламов по плотности 1,5 г/см³ теоретически можно получить концентрат с зольностью 7,88% при выходе 78,2%, в котором содержится более 32% тонких шламов крупностью —0,5 мм (табл. 51)

Таблица 51

Результаты расслоения первичных шламов в тяжелых жидкостях

Класс, мм	Плотность фракций, г/см ³						Итого по классам	
	1,5		1,5—1,8		1,8			
	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %
+3	2,5	5,62	—	—	—	—	2,5	5,62
1—3	17,1	5,61	0,4	30,38	0,1	41,40	17,6	6,35
0,5—1	26,1	10,74	1,2	45,90	0,5	72,42	27,8	13,35
—0,5	32,5	6,95	14,8	30,47	4,8	70,44	52,1	19,48
Итого	78,2	7,88	16,4	31,59	5,4	70,00	100,0	15,12

Осевший продукт (промпродукт) имеет зольность 41,1%. Перечистка его при плотности 1,8 г/см³ дает хвосты с зольностью 70% (теоретически). Таким образом, при обогащении первичных шламов

ЦОФ «Комсомолец» в одну стадию нельзя ожидать получения наряду с кондиционным концентратом многозольных хвостов. В лучшем случае при зольности концентрата, равной 7%, практически можно получить промпродукт с зольностью 35—40%.

При обогащении шламов в гидроциклоне получено два продукта: концентрат и промпродукт. Из концентрата отсевались тонкие шламы — 0,5 мм.

Анализы показали, что в шламах, поступающих в гидроциклон, выход мелочи — 0,5 мм несколько выше, чем в первичных шламах, поступающих из пирамидальных сгустителей.

Таким образом, на шламовую отсадочную машину поступают более крупные сгущенные шламы, чем в гидроциклон.

Результаты обогащения приведены в табл. 52.

Таблица 52

Результаты обогащения шламов ЦОФ «Комсомолец» в гидроциклоне
ИГД-300 (Ж : Т = 2 : 1, расход керосина 250 г/т,
производительность гидроциклона 25 т/ч)

Концентрат		Промпродукт		Шламы		Зольность исходного, %	Параметры	
выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %		диаметр насадки, мм	давление питания, атм
56,0	6,30	3,6	29,80	40,4	22	13,62	40	1,9
48,2	7,70	32,7	31,90	19,1	28	19,58	50	1,9
42,8	4,50	14,2	31,80	43,0	29	19,26	60	1,3
45,0	6,20	10,3	31,20	44,7	21	15,57	60	1,3
40,5	6,00	12,3	30,67	47,2	22	16,68	20	2,0
48,5	6,25	10,5	33,01	41,0	23	16,18	20	1,4
49,0	6,80	6,0	35,93	45,0	23	16,11	20	1,4

В табл. 53 приводятся результаты обогащения при непрерывной работе гидроциклона в течение одной смены.

Таблица 53

Результаты обогащения первичного шлама 0—3 мм
ЦОФ «Комсомолец» в гидроциклоне (давление 1,4 атм,
диаметр насадки 20 мм)

Продукт	Выход, %	Зольность, %
Концентрат	46,3	6,96
Промпродукт	9,0	33,67
Шламы	44,7	21,68
Итого	100,0	15,91

Эти данные показывают, что при обогащении первичных шламов ЦОФ «Комсомолец» в гидроциклоне в водной среде в один прием

получены концентрат с зольностью менее 7% после обезвоживания и промпродукт, содержащий 35% золы. Тонкие шламы, полученные в процессе обезвоживания концентрата, имеют зольность около 20%.

При испытаниях наблюдалось, что изменения зольности, крупности, плотности исходного угля, а также нагрузки гидроциклона

Таблица 54

Гранулометрическая характеристика продуктов обогащения первичного шлама ЦОФ «Комсомолец» в гидроциклонах

Класс, мм	Концентрат			Шламы			Промпродукт			Исходный	
	выход, %			выход, %			выход, %			выход, %	зольность, %
	от про-дукта	от ис-ходного	золь-ность, %	от про-дукта	от ис-ходного	золь-ность, %	от про-дукта	от ис-ходного	золь-ность, %		
+3	5,9	2,7	4,40	—	—	—	0,9	0,1	9,86	2,8	5,62
1—3	35,2	16,3	5,77	—	—	—	18,8	1,7	19,89	18,0	6,35
0,5—1	58,9	27,3	7,93	—	—	—	35,2	3,2	25,95	30,5	16,19
—0,5	—	—	—	—	44,7	18,73	45,1	4,0	45,93	48,7	19,48
Итого	100,0	46,3	6,96	—	44,7	18,73	100,0	9,0	33,67	100,0	15,91

Таблица 55

Результаты фракционного анализа продуктов обогащения первичного шлама ЦОФ «Комсомолец» в гидроциклонах

Класс, мм	Плотность фракции, г/см ³									Итого по классам		
	1,5			1,5—1,8			1,8					
	Выход, %		Зольность, %	Выход, %		Зольность, %	Выход, %		Зольность, %	Выход, %		Зольность, %
	от про-дукта	от ис-ходного		от про-дукта	от ис-ходного		от про-дукта	от ис-ходного		от про-дукта	от ис-ходного	
+3	5,9	2,7	4,40	—	—	—	—	—	—	5,9	2,7	4,40
1—3	34,4	15,9	4,83	0,7	0,3	34,94	0,1	0,1	70,93	35,2	16,3	5,77
0,5—1	56,0	26,0	5,65	2,0	0,9	38,72	0,9	0,4	84,66	58,9	27,3	7,93
Итого	96,3	44,6	5,29	2,7	1,2	37,50	1,0	0,5	82,00	100,0	46,3	6,96

Концентрат

+3	5,9	2,7	4,40	—	—	—	—	—	—	5,9	2,7	4,40
1—3	34,4	15,9	4,83	0,7	0,3	34,94	0,1	0,1	70,93	35,2	16,3	5,77
0,5—1	56,0	26,0	5,65	2,0	0,9	38,72	0,9	0,4	84,66	58,9	27,3	7,93
Итого	96,3	44,6	5,29	2,7	1,2	37,50	1,0	0,5	82,00	100,0	46,3	6,96

Промпродукт

+3	0,8	0,09	7,87	0,1	0,01	30,28	—	—	—	0,9	0,1	9,86
1—3	16,5	1,50	16,40	1,7	0,15	37,44	0,6	0,05	60,44	18,8	1,7	19,89
0,5—1	28,4	2,59	19,99	3,7	0,33	38,87	3,1	0,28	64,90	35,2	3,2	25,95
—0,5	15,8	1,40	29,94	18,8	1,66	44,65	10,5	0,94	72,93	45,1	4,0	45,93
Итого	61,5	5,58	21,45	24,3	2,15	43,40	14,2	1,27	70,86	100,0	9,0	33,67

оказывали заметное влияние на технологические показатели обогащения.

По данным табл. 54 видно, что все классы поддаются обогащению в гидроциклоне. Зольность класса 0,5—1 мм, который имеет наибольший выход в исходных шламах, снизилась в концентрате в два раза. Однако она осталась все же несколько повышенной. Фракционный анализ продуктов обогащения (табл. 55) показывает, что в концентрате содержится около одного процента (0,4% от исходного угля) породных фракций данного класса. Выход фракции плотностью 1,5—1,8 от класса 0,5—1 мм составляет 2%.

Промышленные испытания гидроциклонов диаметром 300 и 400 мм для обогащения угольной мелочи в водной среде с применением реагента-гидрофобизатора показали, что этот способ является более эффективным. Применение реагента повышает выход концентрата на 8—10% и снижает его зольность по сравнению с зольностью исходного шлама на 5% (до обезвоживания). В качестве реагента могут быть применены технический керосин (расход 30—50 г/т) или поглотительное масло, которое в настоящее время применяется на фабрике для флотации угля.

КЛАССИФИКАЦИЯ, СГУЩЕНИЕ И ОСВЕТЛЕНИЕ В ГИДРОЦИКЛОНАХ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ УГЛЯ В ГИДРОЦИКЛОНАХ

Классификация угля широко применяется при обогащении различными методами. При этом наибольшие затруднения возникают в случае выделения из угля мелких и тонких частиц.

В практике углеобогащения для классификации мелкого угля применяются различные типы быстроходных плоскокачающихся или вибрационных грохотов. За последнее время получили распространение неподвижные грохоты с плоско-вогнутыми ситами. Кроме того, выделение (осаждение) тонких частиц производится в цилиндрических и конических сгустителях и пирамидальных отстойниках. Однако осветлительные устройства осадительного типа обладают двумя существенными недостатками — громоздкостью и недостаточно четким разделением. Так, например, производительность пирамидальных отстойников при осаждении крупнозернистых угольных шламов составляет по сливу 10—15 м³/ч на 1 м², а цилиндрических сгустителей при осаждении мелкозернистых шламов — 1,5—2,5 м³/ч на 1 м² площади осаждения.

Эффективность разделения по граничному зерну в пирамидальных отстойниках и цилиндрических сгустителях не превышает 50—60%.

Грохоты, оборудованные специальными ситами, имеют также низкую производительность при классификации, достигающую до 10 м³/ч на 1 м² полезной площади сит.

Механические классификаторы не нашли широкого применения в углеобогатительной практике вследствие их относительно низкой производительности.

При дешламации угля, классификации угольных шламов и регенерации тяжелых суспензий могут с успехом применяться гидроциклоны. Об этом свидетельствуют данные о классификации в гидроциклонах рудных пульп и результаты специальных исследований, проведенных с угольными пульпами.

Путем изменения основных параметров гидроциклона в нем можно создавать различное соотношение сил, действующих на твер-

дые частицы, и, таким образом, производить разделение угля по желаемой граничной крупности. При этом все зерна крупнее граничного будут отброшены центробежной силой к периферии и удалены через разгрузочную насадку, а более мелкие будут унесены восходящим потоком через сливное отверстие.

Проведенное Келсаллом исследование влияния основных факторов на эффективность классификации материала в гидроциклоне показало, что гидроциклон является весьма эффективным классифицирующим аппаратом. Келсалл проводил опыты по классификации в гидроциклоне диаметром 76 мм смеси зерен сферической формы одинаковой плотности, но разной крупности. Смесь перед опытами хранилась в воде в присутствии аэрозоля ОТ для того, чтобы обеспечить полное смачивание поверхности зерен водой. Были приняты также специальные меры против попадания в гидроциклон вместе с материалом воздушных пузырьков¹. Оценка эффективности разделения при классификации сделана Келсаллом тремя методами:

1) предложенным Дальстромом, основанном на том, что каждая фракция по крупности или плотности распределяется пополам, т. е. 50% поступает в слив, а 50% разгружается через насадку (метод d_{50});

2) примененным Фитчем и Джонсоном [34], при котором за единицу сравнения принимается такой случай, когда 95% класса заданной крупности содержится в нижнем продукте;

3) примененным Келсаллом, при котором за основу берется случай, когда 100% класса заданной крупности уходит в слив (или в нижний продукт).

Вероятно, наиболее правильным методом является последний. Однако в дальнейших рассуждениях Келсалла, по-видимому, допускается некоторая ошибка, так как количества жидкости и твердого материала, прошедших через разгрузочную насадку, не изменяются пропорционально, как это принято им.

На основании экспериментального исследования влияния переменных факторов на эффективность процесса разделения по крупности в гидроциклоне сделаны следующие выводы:

1) при уменьшении диаметра входного отверстия (от 15,9 до 6,3 мм) заметно повышается эффективность процесса классификации:

2) длинное, узкое и прямоугольное входное отверстие не дает значительного повышения эффективности по сравнению с круглым отверстием равной площади;

3) с уменьшением диаметра сливного отверстия эффективность разделения тонких частиц повышается;

4) при классификации более крупного материала эффективность процесса повышается в случае уменьшения (до определенного предела для каждого класса разделения) диаметра сливного отверстия,

¹ Ранее указывалось, что избежать возникновения в гидроциклоне пузырьков газов, выделяющихся из воды, весьма трудно.

при дальнейшем уменьшении этого диаметра эффективность процесса разделения падает;

5) укорачивание сливной трубки приводит к повышению эффективности разделения тонких частиц, при этом эффективность разделения крупных частиц снижается в некоторых случаях до 10% из-за чрезмерного уменьшения длины сливной трубки;

6) в пределах оптимального давления существует прямая зависимость между эффективностью процесса классификации в гидроциклоне и давлением на входе;

7) уменьшение диаметра разгрузочного отверстия снижает эффективность разделения частиц всех размеров.

Указанные зависимости во многом подтверждаются и при классификации угля в гидроциклонах.

Установлено, что при классификации мелкого угля гидроциклоны могут работать при низких давлениях на входе (0,5 *ати*), что позволяет иногда обходиться без применения насоса. В этом случае гидроциклоны устанавливаются на 5—6 м ниже сборника, откуда в них самотеком поступает угольный шлам.

Минимальным размером граничного зерна при классификации угля в гидроциклонах принято считать 0,15 мм, однако при тщательной регулировке можно получить достаточно четкое разделение по зерну 0,05 мм.

В табл. 56 приведены результаты классификации угля крупностью 0—1 мм в промышленных условиях в гидроциклоне диаметром 350 мм при давлении на входе 0,5 *ати*. Гидроциклон отрегулирован для разделения по граничному зерну 0,35 мм.

Таблица 56

Результаты классификации угля крупностью 0—1 мм в гидроциклоне

Класс, мм	Выход, %		
	исходный	нижний продукт	верхний продукт
0,5—1	32,0	48,0	—
0,35—0,5	15,0	21,8	1,2
0,21—0,35	18,0	20,0	13,8
0,105—0,21	19,0	7,5	42,0
0,06—0,105	6,0	1,2	15,6
—0,06	10,0	1,5	27,4
Итого	100,0	100,0	100,0
Выход от исходного, %	100,0	66,9	33,1

Сливной продукт вполне удовлетворительный. Однако в нижнем продукте выход класса 0—0,35 мм составлял 30%. Для полного выделения этого класса нижний продукт должен быть направлен в другой гидроциклон для повторной классификации.

2. СГУЩЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ В ГИДРОЦИКЛОНАХ

В практике обогащения полезных ископаемых гидроциклоны применяются для сгущения шламов и осветления шламовых и оборотных вод. Применяющиеся для этих целей гидроциклоны конструктивно отличаются от гидроциклонов для обогащения тем, что имеют меньший угол конусности.

По существу процессы сгущения шламов и осветления шламовых вод в гидроциклонах не отличаются друг от друга.

Требования, предъявляемые к осветленной моечной воде, могут быть различными в зависимости от местных условий, однако, как правило, содержание твердого в ней не должно превышать 100 г/л, если она используется в качестве оборотной воды. В большинстве случаев предпочтительно иметь концентрацию твердого в оборотной воде не более 50 г/л, но иногда она достигает 250 г/л и более.

Применяемые в настоящее время сгустители и отстойники не обеспечивают достаточно эффективного осветления моечной воды, так как скорость осаждения в них мельчайших частиц невелика. Процесс осветления моечной воды значительно ускоряется в поле центробежных сил. Поэтому гидроциклон обладает значительно большими производительностью и эффективностью и занимает очень малую площадь и объем производственного помещения.

На действующих углеобогатительных фабриках концентрация твердого в моечной воде часто бывает очень высокой. В этих случаях существующие отстойники и сгустители могут быть дополнены гидроциклонами для обеспечения нормального процесса осветления моечной воды.

Гидроциклоны могут успешно применяться и для осветления воды при дещлакации мелкого угля. Мокрое грохочение или дещлакация с размером отверстий сит 0,5 мм и менее требует значительного расхода воды на ополаскивание. Для этой цели обычно расходуется около 3,5 м³ воды на 1 т обесшламливаемого угля. Если подрешетный продукт грохотов направить в гидроциклоны для сгущения шламов, то полученную осветленную воду можно снова подавать на грохоты для ополаскивания угля.

По данным Кругсмана [40], два гидроциклона диаметрами 350 мм, работающие в замкнутом цикле с грохотами, могут обеспечить по производительности осветление такого количества воды, которое вполне достаточно для дещлакации 60 т мелкого угля.

На углеобогатительной фабрике «Статминен» (Голландия) уголь крупностью 0—99 мм дещламируется на грохоте с размером отверстий сита 0,5 × 2 мм.

Подрешетный продукт этого грохота поступает в гидроциклон под давлением 1,3 атм. На последнюю секцию по длине грохота подается столько свежей воды, сколько уходит ее вместе со сгущенным продуктом из гидроциклона. Слив из гидроциклона подается на первую секцию того же грохота. Грохот пропускает до 40 т/ч угля, при этом в гидроциклон поступает 220 м³/ч шламовой воды.

В табл. 57 приведены результаты сгущения шламов и осветления воды на этой фабрике. В сгущенных шламах (нижнем продукте гидроциклона) содержится 195 г/л твердого, а в осветленной воде остается 32 г/л твердого, в котором содержится 93,9% частиц размером — 0,06 мм. В шламах, поступающих в гидроциклон, содержится 72,6 г/л твердого.

Таблица 57

Результаты осветления воды в гидроциклоне

Класс, мм	Выход, %		
	исходный	слив	сгущенный продукт
1,9—4	0,1	0,0	0,1
1,0—1,9	4,4	0,0	6,5
0,5—1,0	11,4	0,4	16,8
0,35—0,5	10,7	0,6	15,7
0,21—0,35	10,5	0,9	15,2
0,125—0,21	11,7	1,6	16,7
0,06—0,125	5,8	2,6	7,4
0—0,06	45,4	93,9	21,6
Итого	100,0	100,0	100,0
Содержание твердого, г/л	72,6	32,0	195,0

Со сгущенными шламами, поступающими на флотацию из гидроциклона, удаляется около 50 м³/ч воды и с обесшламленным углем — 5 м³/ч. Таким образом, применение гидроциклона дает возможность расходовать только 55 м³/ч свежей воды для дешламации 40 т угля.

Испытания показали, что в случае необходимости содержание твердого в сгущенном продукте можно повысить до 500 г/л, но при этом в осветленной воде концентрация твердого несколько повысится.

Степень сгущения шламов или осветления воды в гидроциклоне зависит от многих факторов, из которых основными являются: концентрация твердого в исходном; зернистость материала; диаметр гидроциклона; диаметры сливного и разгрузочного отверстий; давление на входе; угол конусности гидроциклона; диаметр входного отверстия.

Регулировка работы гидроциклона при сгущении шламов и осветлении моечных вод заключается в подборе соотношений диаметров сливного и разгрузочного отверстий, в подборе размера входного отверстия и давления на входе. При классификации отношение диаметров разгрузочного и сливного отверстий должно быть меньше, чем при осветлении, и больше, чем при сгущении. Чем меньше диаметр разгрузочной насадки, тем выше степень сгущения. Изменение концентрации твердого в сгущенном продукте гидроциклона диа-

метром 350 мм в зависимости от диаметра разгрузочной насадки показано на рис. 96.

Как уже указывалось, при работе гидроциклона внутри его образуется воздушный столб, разрежение в котором может колебаться в пределах 0—1000 мм вод. ст.

С уменьшением диаметра разгрузочного отверстия, вызывающим повышение степени сгущения, происходит увеличение разрежения в воздушном столбе. Это обусловлено увеличением концентрации твердых частиц в нижней зоне гидроциклона и повышением сопротивления прохождению потока через разгрузочное отверстие. Вследствие этого увеличивается количество жидкости, вытекающей через сливное отверстие, что вызывает усиление всасывающего действия и повышает разрежение в воздушном столбе.

Результаты экспериментального исследования показали, что существует линейная зависимость между разрежением в воздушном столбе и в сливном патрубке [11].

Выше отмечалось, что при погружении концов разгрузочных патрубков гидроциклона в жидкость возникает замкнутая система, в которой условия в сливном патрубке влияют на разрежение в воздушном столбе. Для этого случая выведена следующая зависимость:

Таблица 58

Зависимость между высотой всасывания сливного патрубка и степенью сгущения шламов

Высота всасывания сливного патрубка, м	Плотность шламов, г/см ³
2,25	1,95
2,15	1,89
2,05	1,84
1,95	1,75
1,85	1,68
1,75	1,61
1,65	1,55

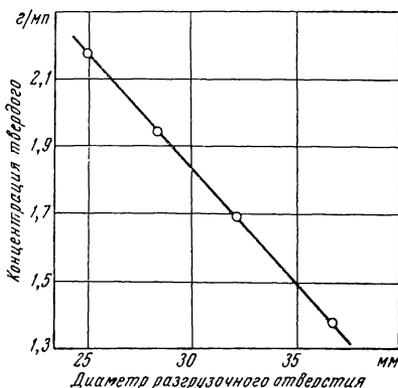


Рис. 96. Зависимость степени сгущения шлама от диаметра разгрузочного отверстия гидроциклона

$$L_s = \frac{p_{ат}}{\rho_1} - \frac{v_A^2 - v_G^2}{2g} - \frac{\rho_A}{\rho} + h_x, \quad (90)$$

где L_s — длина разгрузочного патрубка (высота всасывания);

$p_{ат}$ — атмосферное давление;

ρ — плотность шлама.

Степень сгущения в гидроциклоне изменяется также в зависимости от высоты свободного конца сливной трубки над питающим патрубком (табл. 58).

Установленные зависимости позволяют регулировать степень сгущения шламов в гидроциклоне путем изменения величины разрежения в воздушном столбе. Это может быть осуществлено подачей воздуха в сливной патрубок или изменением разницы высот между концом сливной трубки и питающим патрубком гидроциклона.

Влияние давления на степень сгущения шламов и осветления оборотных вод в гидроциклоне находится в зависимости от ряда переменных факторов и, в первую очередь, от гранулометрического

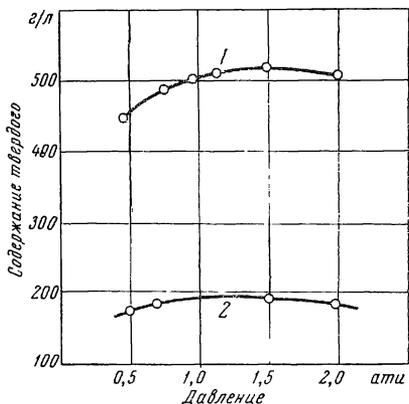


Рис. 97. Влияние давления на входе на эффективность осветления оборотной воды в гидроциклоне:

1 — сгущенный продукт; 2 — слив

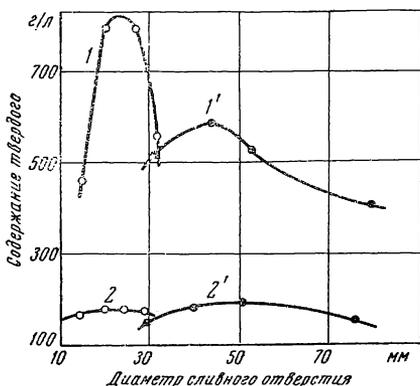


Рис. 98. Влияние диаметра сливного отверстия на результаты осветления оборотной воды в гидроциклоне:

1 — сгущенный продукт при $d_{ц} = 8$ мм; 1' — сгущенный продукт при $d_{ц} = 20$ мм; 2 — слив при $d_{ц} = 8$ мм; 2' — слив при $d_{ц} = 20$ мм

состава исходного материала. Наличие большого количества очень мелких частиц в оборотной воде позволяет производить ее осветление в гидроциклоне при относительно низких давлениях.

Изменение давления в пределах 0,5—2 ати (рис. 97) не оказывает существенного влияния на результаты осветления. Однако

повышение давления увеличивает производительность гидроциклона. Так, например, если при давлении 0,5 ати гидроциклон диаметром 100 мм пропускал 2,73 м³/ч оборотной воды, то при повышении давления до 2 ати производительность его достигла 5,87 м³/ч.

Поскольку от давления на входе зависит производительность гидроциклона, но оно несущественно влияет на эффективность процесса осветления, целесообразно

работать при более низких давлениях, а потерю производительности компенсировать применением гидроциклонов большего диаметра или батареи гидроциклонов малых диаметров.

Таблица 59

Результаты ситового анализа твердого, содержащегося в мочной воде углеобогатительной фабрики Днепродзержинского КХЗ

Класс, мм	Выход, %	Зольность, %
0,5—1	—	—
0,25—0,5	1,5	8,5
0,18—0,25	4,0	12,2
—0,18	94,5	21,7
Итого	100,0	21,3

Влияние размеров разгрузочных отверстий на эффективность осветления оборотной воды в гидроциклонах было исследовано в промышленных условиях на фабрике Днепродзержинского коксохимического завода. В оборотной воде фабрики содержалось 210—230 г/л твердого. Как видно из данных табл. 59, твердая часть представлена в основном тонкими классами, при этом выход класса 0—0,18 мм составляет около 95% при зольности до 22%.

На рис. 98 показаны кривые влияния диаметра сливного отверстия на эффективность осветления оборотной воды в гидроциклоне.

Уменьшение диаметров сливного и разгрузочного отверстий приводит к некоторому снижению содержания твердого в сливе и к значительному увеличению степени сгущения шламов; при этом изменение диаметра одного из отверстий вызывает необходимость изменения другого отверстия с целью сохранения наиболее выгодного соотношения, которое в данном случае равнялось 2,5 (1,5).

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБОГАЩЕНИЯ

Для обогащения мелкого угля наиболее широкое распространение получили отсадочные машины, которые применяются также и для обогащения шламов. Внедрение гидроциклонов для обогащения мелкого угля в тяжелых суспензиях или в водной среде следует осуществлять в тех случаях, когда это оказывается более экономичным, чем применение хорошо освоенных отсадочных машин, длительное время работающих на углеобогажительных фабриках. Для сравнения технико-экономических показателей рассматривалось три варианта обогащения углей Краснодарской группы шахт. Угли этих шахт многозольные и сернистые. Содержание золы в классе 0—6 мм составляет 23,0%, а серы — 4,5%. По I варианту предусматривалось обогащение мелких классов углей (0—3 или 0—6 мм) в гидроциклонах с применением магнетитовой суспензии, по II варианту — в гидроциклонах в водной среде и по III варианту — в отсадочных машинах. Для каждого из вариантов разработаны технологические схемы обогащения, составлена спецификация оборудования, определены объемы необходимого здания, сооружения и рассчитаны капитальные и эксплуатационные затраты¹. Технологические показатели обогащения, принятые на основании данных исследований и опыта работы установки на фабриках, приведены в табл. 60.

В этих показателях отражены все виды затрат, только непосредственно относящихся к данному процессу обогащения в гидроциклонах или отсадочных машинах, с учетом обезвоживания и сушки продуктов обогащения. Следовательно, такие операции (общие для всех приведенных трех вариантов), как прием угля, классификация его, выдача продуктов обогащения, отвал породы, энергетическое и другие хозяйства и т. д., ни в капитальных, ни в эксплуатационных затратах не учтены. При желании определить полную сумму капитальных затрат или эксплуатационных расходов эти затраты должны быть предусмотрены дополнительно к приведенным в настоящем

¹ Работа выполнена в проектной части Института горючих ископаемых.

Технологические показатели обогащения углей Краснодарской группы шахт в гидроциклонах и в отсадочных машинах, %

Продукт	В гидроциклоне				В отсадочной машине	
	в тяжелой суспензии		в водной среде		выход	зольность
	выход	зольность	выход	зольность		
Концентрат	61,7	4,86	61,7	6,8	61,7	6,9
Промпродукт	21,1	27,42	21,1	29,5	21,1	30,1
Хвосты	17,2	73,90	17,2	65,1	17,2	63,3
Исходный	100,0	21,49	100,0	21,62	100,0	21,56

расчете показателям стоимости процесса обогащения в гидроциклонах и отсадочных машинах.

В расчетах принято:

число рабочих дней в году — 300;

число часов работы — 20 (три смены).

Производительность отделения (установки) по I и III вариантам 96 т/ч = 576 тыс. т/год; по II варианту — 119 т/ч = 714 тыс. т/год.

Т а б л и ц а 61

**Капитальные затраты определены по сметно-финансовым расчетам в новом масштабе цен
Капитальные затраты, тыс. руб.**

Наименование затрат	Варианты		
	I	II	III
Технологическое оборудование и монтаж	222,8	408,9	215,7
Электрооборудование	44,6	36,0	29,4
Автоматика и КИП	32,8	26,5	21,7
Итого по оборудованию и монтажу	300,2	471,4	266,8
Здания	168,8	168,8	415,4
Мосты (и др. сооружения)	24,0	24,0	24,0
Итого по зданиям и сооружениям	192,8	192,8	439,4
Прочие затраты	49,3	66,4	70,6
Всего капитальных затрат	542,3	730,6	776,8

Эксплуатационные затраты

а) Заработная плата с начислениями

Штат трудящихся определен по расчету:

для I—II вариантов — 30 человек,

для III варианта — 50 человек.

Среднемесячная зарплата трудящихся (с учетом доплат и др.) определена в 131 руб. Начисления на зарплату приняты в размере 9%.

Годовой фонд зарплаты с начислениями определится на 1 т угля:

для I варианта $131 \times 12 \times 30 \times 1,09 = 51,4$ тыс. руб., или 0,09 руб.;

для II варианта — = 51,4 тыс. руб., или 0,07 руб.;

для III варианта $131 \times 12 \times 50 \times 1,09 = 85,7$ тыс. руб., или 0,15 руб.

б) Материалы

Расход свежей воды на 1 т угля определен по I и II вариантам 0,2 м³ и по III варианту 0,6 м³.

При средней стоимости для Донбасса 1 м³ воды 0,02 руб. затраты на воду составят:

по I и II вариантам 0,004 руб. и по III варианту 0,012 руб.

Кроме того, расходуется на 1 т угля:

по I варианту 1 кг магнетита стоимостью 0,005 руб.;

по II варианту 50 г керосина стоимостью 0,002 руб.

Итого затраты на материалы на 1 т угля:

по I варианту $0,004 + 0,005 = 0,009$ руб.;

по II варианту $0,004 + 0,002 = 0,006$ руб.;

по III варианту = 0,012 руб.

С учетом прочих материалов (смазочные, обтирочные и др.) затраты принимаются: по I варианту 0,014 руб.; по II варианту — 0,011 руб.; по III варианту — 0,017 руб.

в) Электроэнергия

Установленная мощность токоприемников и годовой расход электроэнергии определены по расчету:

по I варианту 1312 квт — 3200 тыс. квт·ч.;

по II варианту 1058 квт — 3500 тыс. квт·ч.;

по III варианту 866 квт — 2900 тыс. квт·ч.

При стоимости по двухставочному тарифу Донбассэнерго 1 квт максимальной нагрузки 26,4 руб. на 1 квт·ч 0,041 руб. затраты по статье электроэнергия составят на 1 т угля:

по I варианту $(1312 \times 26,4) + (3200 \times 0,0041) = 47,8$ тыс. руб., или 0,083 руб.;

по II варианту $(1058 \times 26,4) + (3500 \times 0,0041) = 42,3$ тыс. руб., или 0,059 руб.;

по III варианту $(866 \times 26,4) + (2900 \times 0,0041) = 34,8$ тыс. руб., или 0,061 руб.;

г) *Сжатый воздух*

Расход сжатого воздуха определен только для I и II вариантов (на работу АФП) 15 м³/мин, или 900 м³/ч. Затраты на сжатый воздух составят (при цене 0,005 руб/м³)

$$\frac{900 \times 0,005}{96} = 0,047 \text{ руб. на } 1 \text{ т угля.}$$

д) *Топливо*

Расход топлива на сушку продуктов обогащения определен: по I варианту 2,5 т/ч, по II варианту 2,9 т/ч, по III варианту 2,6 т/ч.

В качестве топлива принят промпродукт (3500 ккал/кг) стоимостью 4,4 руб. за 1 т. Затраты на топливо составят на 1 т рядового угля:

$$\text{по I варианту } \frac{4,4 \times 2,5}{96} = 0,115 \text{ руб.};$$

$$\text{по II варианту } \frac{4,4 \times 2,9}{119} = 0,108 \text{ руб.};$$

$$\text{по III варианту } \frac{4,4 \times 2,6}{96} = 0,12 \text{ руб.}$$

е) *Пар на отопление*

Отопительный сезон по Донецкому бассейну принят 5 месяцев в году.

Расход пара определен для I и II вариантов 0,7 т/ч и для III варианта 1,5 т/ч, что при средней стоимости 1 т пара 2,5 руб. составит на 1 т рядового угля:

$$\text{для I варианта } \frac{2,5 \times 0,7 \times 5}{96 \times 12} = 0,008 \text{ руб.};$$

$$\text{для II варианта } \frac{2,5 \times 0,7 \times 5}{119 \times 12} = 0,006 \text{ руб.};$$

$$\text{для III варианта } \frac{2,5 \times 1,5 \times 5}{96 \times 12} = 0,016 \text{ руб.}$$

ж) *Амортизационные отчисления*

Амортизационные отчисления определены в размере 6% от капитальных затрат и составят на 1 т рядового угля:

$$\text{по I варианту } 542,3 \times 0,06 = 32,5 \text{ тыс. руб., или } 0,057 \text{ руб.};$$

$$\text{по II варианту } 730,6 \times 0,06 = 43,8 \text{ тыс. руб., или } 0,061 \text{ руб.};$$

$$\text{по III варианту } 776,8 \times 0,06 = 46,6 \text{ тыс. руб., или } 0,081 \text{ руб.}$$

з) *Прочие затраты*

Прочие затраты учтены в размере 5% в общей структуре затрат на процесс обогащения угля в гидроциклонах и отсадочных машинах и составят на 1 т рядового угля:

$$\text{по I варианту } 0,025 \text{ руб.};$$

$$\text{по II варианту } 0,018 \text{ руб.};$$

$$\text{по III варианту } 0,023 \text{ руб.}$$

Проведенный технико-экономический анализ и сравнение различных способов обогащения угля показали, что обогащение в гидроциклонах является более рентабельным, в особенности с применением тяжелой суспензии (табл. 62).

Аналогичный вывод был сделан при сравнении технико-экономических показателей переобогащения промежуточного продукта

Эксплуатационные затраты на обогащение 1 т угля (для данного процесса)

Элементы затрат	Затраты на 1 т рядового угля, руб.		
	Варианты		
	I	II	III
Зарплата с начислениями	0,090	0,070	0,150
Материалы	0,014	0,011	0,017
Электроэнергия	0,083	0,059	0,061
Сжатый воздух	0,047	0,047	—
Топливо	0,115	0,108	0,120
Пар	0,008	0,006	0,016
Амортизация	0,057	0,061	0,081
Прочие затраты	0,025	0,018	0,023
Итого	0,44	0,38	0,47

в гидроциклонах и в отсадочных машинах в промышленных условиях, на углеобогащательной фабрике Рурского угольного бассейна. Эта фабрика оборудована современными отсадочными машинами и обогащает уголь, в котором содержание сростков (промпродуктовые фракции плотностью 1,5—1,8) в классе +10 мм составляет

Т а б л и ц а 63

Результаты ситового анализа промпродукта

Крупность, мм	Выход, %	Зольность, %
4—10	40,2	37,1
2—4	24,5	41,5
1—2	17,9	44,0
0,5—1	9,7	42,2
0—0,5	7,7	34,5
Итого . .	100,0	39,8

8,8%, а в мелком — 3,4%. При обогащении угля на отсадочных машинах получается три продукта: концентрат, промпродукт и хвосты.

По I варианту промпродукт, дробленный до 10 мм, вместе с мелким материалом обогащается в гидроциклонах в магнетитовой суспензии.

По II варианту этот же промпродукт обогащается в контрольных отсадочных машинах.

Из результатов ситового анализа промпродукта (табл. 63) следует, что основная его масса представлена классом 4—10 мм (выход 40%), имеющим зольность 37%.

Результаты обогащения промпродукта в отсадочной машине и в гидроциклонах при выделении двух конечных продуктов приведены в табл. 64. При обогащении в контрольной отсадочной машине были получены котельное топливо с зольностью 25% и порода с зольностью 69,4%, тогда как после гидроциклонов котельное топливо имело зольность 18,5%, а порода — 72,4%.

**Результаты обогащения промпродукта с выделением
двух конечных продуктов**

Плотность фракции, <i>г/см³</i>	Выход от исход- ного, %	Котельное топливо			Порода		
		Выход, %		Извлече- ние, %	Выход, %		Извлече- ние, %
		от про- дукта	от исход- ного		от про- дукта	от исход- ного	
<i>В отсадочной машине</i>							
<1,5	36,7	54,9	36,4	99,2	1,0	0,3	0,8
1,5—1,8	22,8	26,7	17,7	77,6	15,0	5,1	22,4
>1,8	40,5	18,4	12,2	30,0	84,0	28,3	70,0
Итого . . .	100,0	100,0	66,3	—	100,0	33,7	—
Зольность, % . .	40,1	25,0	—	—	69,4	—	—
<i>В гидроциклонах</i>							
<1,5	36,7	61,2	36,7	100,0	0,0	0,0	0,0
1,5—1,8	22,8	36,1	21,6	94,3	3,1	1,2	5,3
>1,8	40,5	2,7	1,6	4,0	96,9	38,9	96,0
Итого . . .	100,0	100,0	59,9	—	100,0	40,1	—
Зольность, % . .	40,1	18,5	—	—	72,4	—	—

Если содержание тяжелой фракции плотностью > 1,8 в породе отсадки составляло 84%, то в породе гидроциклонов оно повысилось до 96,9%; содержание промежуточных фракций плотностью 1,5—1,8 в породе при переобогащении в отсадочной машине составляло 15%, а в гидроциклонах — 3,1% при полном отсутствии легких фракций плотностью < 1,5.

Таблица 65

**Результаты обогащения промпродукта в гидроциклонах
с выделением трех конечных продуктов**

Плотность фракции, <i>г/см³</i>	Выход от исход- ного, %	Концентрат			Котельное топливо			Порода		
		Выход, %		Извлечение, %	Выход, %		Извлечение, %	Выход, %		Извлечение, %
		от про- дукта	от исход- ного		от про- дукта	от исход- ного		от про- дукта	от исход- ного	
<1,5	36,7	99,6	30,8	84,0	20,3	5,9	16,0	—	—	—
1,5—1,8	22,8	0,4	0,1	0,4	74,2	21,5	34,3	3,1	1,2	5,3
>1,8	40,5	—	—	—	5,5	1,6	4,0	96,9	38,9	96,0
Итого	100,0	100,0	30,9	—	100,0	29,0	—	100,0	40,1	—
Зольность, %	40,1	4,3	—	—	33,6	—	—	72,4	—	—

При обогащении промпродукта в гидроциклонах в две стадии (в суспензиях плотностью 1,5 и 1,8 г/см³) были получены: концентрат, пригодный для коксования, котельное топливо и высокозольная порода (табл. 65).

В табл. 66 приведены суммы затрат (в пересчете с немецких марок на рубли) при переобогащении промпродукта различными способами.

Таблица 66

Затраты при различных способах переобогащения промпродукта

Виды затрат	Отсадка с выделением двух продуктов		Обогащение в гидроциклоне			
			с выделением двух продуктов		с выделением трех продуктов	
	руб. в год	коп. на 1 т	руб. в год	коп. на 1 т	руб. в год	коп. на 1 т
<i>Здание</i>						
Амортизация	2 338	3,4	2 087	3,2	2 187	3,2
Арендная плата	2 428		2 551		2 551	
<i>Машины и оборудование</i>						
Амортизация	6 480	6,8	3 780	4,0	6 912	7,3
Арендная плата	3 780		2 205		4 032	
Материалы	4 464	2,7	360	0,2	453	0,63
Запчасти	—	—	4 320	2,9	—	—
Грохоты и трубопроводы . .	—	—	—	—	4 320	2,9
Гидроциклоны и насосы . . .	—	—	—	—	2 592	1,7
Подготовка суспензии	—	—	745	0,5	1 728	1,0
Магнетит	—	—	—	—	2 484	1,7
Погрузка и транспорт	—	—	1 800	1,2	3 744	2,5
Электроэнергия	2 646	1,8	4 739	3,1	8 145	5,4
Вода	2 502	1,7	4 491	3,0	4 990	3,3
Надзор, обслуживание и ремонт	3 642	2,7	7 920	5,3	9 168	6,1
Общие затраты	28 080	19,1	34 998	23,4	53 306	354,0

В табл. 67 приведены сводные данные по качественно-количественным показателям, затратам и экономии при обогащении промпродукта различными способами.

В табл. 68 приведены общие технико-экономические показатели при переобогащении промпродукта различными способами.

Доходы от реализации дополнительного количества концентрата, полученного при обогащении в гидроциклонах, полностью покрывают повышенные затраты, связанные с применением тяжелых суспензий, и дают годовую экономию в размере 423 тыс. руб. при одной стадии обогащения и 690 тыс. руб. при обогащении в две стадии.

При этом экономия при обогащении в гидроциклонах на 1 т промпродукта составляет в первом случае 2,8, во втором — 4,6 руб.

**Сводные данные по качественно-количественным показателям,
затратам и экономии при обогащении промпродукта
различными способами**

Показатели	Отсадка с выделением двух продуктов	Обогащение в гидроциклонах	
		с выделением двух продуктов	с выделением трех продуктов
<i>Котельное топливо</i>			
Выход, %	66,3	59,9	29,0
Количество, т	331,5	299,5	145,0
Зольность, %	25,0	18,5	33,6
Влажность, %	8,0	8,0	8,0
Содержание балласта, %	31,0	25,0	38,91
Плавкость золы	Умеренная	Хорошая	Хорошая
<i>Концентрат</i>			
Выход, %	—	—	30,9
Количество, т	—	—	154,5
Зольность, %	—	—	4,3
Влажность, %	—	—	10,0
Количество воды, т	—	—	171,7
<i>Экономические показатели (при переобогащении промпродукта 500 т/сутки)</i>			
Общая стоимость суточной продукции, руб.	2351	2511	2666
Суточные расходы на переобогащение, руб.	—98	—117	—178
Суточные доходы, руб.	2252	2394	2483
Экопомия, руб.:			
за сутки	—	141	230
за год	—	42 300	69 000

Таблица 68

**Общие технико-экономические показатели при обогащении
промпродукта различными способами**

Показатели	Отсадка с выделением двух продуктов	Обогащение в гидроциклонах	
		с выделением двух продуктов	с выделением трех продуктов
<i>Расходы на обогащение 500 т/сутки, руб/т</i>			
Капитальные вложения	0,10	0,07	0,10
Материалы	0,03	0,05	0,10
Энергия	0,04	0,06	0,09
Эксплуатационные расходы	0,03	0,05	0,06
Сумма затрат	0,20	0,23	3,50

Доходы от реализации продуктов обогащения 500 т угля в сутки составляют на 1 т промпродукта:

- с выделением двух продуктов — 28 коп.;
- с выделением трех продуктов — 46 коп.

ЛИТЕРАТУРА

1. А да м о в Г. А., А н д р е с У. Ц. Вязкость тонкодисперсных минеральных суспензий. Вопросы теории гравитационных методов обогащения полезных ископаемых (Труды Всесоюзного совещания). Госгортехиздат, 1960.
2. А ко п о в М. Г., К л а с с е н В. И. Применение гидроциклонов при обогащении углей. Госгортехиздат, 1960.
3. А ко п о в М. Г., К л а с с е н В. И., П л а к с и н И. Н. Обогащение угольной мелочи в гидроциклонах. Углетехиздат, 1956.
4. А ко п о в М. Г., В е н к о в а М. Д., К л а с с е н В. И., П л а к с и н И. Н. К теории обогащения мелкого угля в гидроциклонах. Изв. АН СССР, ОТН, № 4, 1958.
5. А ко п о в М. Г., К л а с с е н В. И., Л и т о в к о В. И. Вопросы теории действия гидроциклонов. Сб. научных трудов института ВНИИУглеобогащение, № 10, Госгортехиздат, 1959.
6. А ко п о в М. Г., В е н к о в а М. Д., К о р с а к Л. Д. Исследование скорости движения твердых частиц в гидроциклоне. Сб. «Обогащение и брикетирование углей». № 20, Госгортехиздат, 1961.
7. А ко п о в М. Г., К о р с а к Л. Л. Исследование движения твердых частиц в тяжелой среде в гидроциклоне. Сб. «Обогащение и брикетирование углей», № 30, Госгортехиздат, 1963.
8. А ко п о в М. Г., Л и т о в к о В. И. Флотация в гидроциклоне. Бюллетень цветной металлургии, № 17, 1958.
9. А ко п о в М. Г., К л а с с е н В. И., П л а к с и н И. Н., Л и т о в к о В. И. О некоторых процессах, происходящих в гидроциклоне при обогащении углей. Труды ИГД АН СССР. Обогащение полезных ископаемых. Академиздат, 1960.
10. А ко п о в М. Г., М а л о ф е е в а К. Т. Обогащение углей в тяжелой суспензии. Сб. «Обогащение и брикетирование углей» № 5 (9). Госгортехиздат, 1962.
11. А ко п о в М. Г., К л а с с е н В. И., П л а к с и н И. Н. О действии реагентов при обогащении углей в гидроциклоне. Вопросы теории гравитационных методов обогащения полезных ископаемых (Труды Всесоюзного совещания). Госгортехиздат, 1960.
12. А с п и с И. М., С е м е н е н к о Б. А., Н е х о р о ш и й И. Х. Обогащение угля в глинистых суспензиях, находящихся в состоянии турбулентного движения. Научные труды института УкрНИИУглеобогащение, т. 4. Госгортехиздат, 1962.
13. Б о ч к о в Ю. Н., К о р с а к Л. Л. Исследование работы шнековых осадительных центрифуг с помощью радиоактивных изотопов. Сб. «Обогащение и брикетирование углей», № 16, Госгортехиздат, 1960.
14. Б у р т о н Г., Л е ф е б ю р А. Различные способы обогащения мелкого угля и их экономичность. IV Международный конгресс по обогащению углей, 1962. Сокращенный перевод. Изд-во «Недра», 1964.
15. В е р и г о К. Н. Применение гидроциклонов в промышленности капиталистических стран. Бюллетень ЦИИИ цветной металлургии, 1956.
16. Г е й р о в с к и й Я. Полярнографический метод. ОНТИ. Химтехиздат, 1937.

17. Г о р о ш к о В. Д. Стесненное падение шара в вязкой жидкости. Вестник АН СССР, № 8. Изд-во АН СССР, 1955.
18. И з г а р ы ш е в Н. А., Г о р б а ч е в С. В. Курс теоретической электрохимии. Госхимиздат, 1951.
19. К а р а н д е е в К. Б. Мостовые методы измерения. Гостехиздат, 1953.
20. К л а с с е н В. И. Элементы флотации каменных углей. Госхимиздат, 1953.
21. К л а с с е н В. И. Вопросы теории аэрации и флотации. Госхимиздат, 1949.
22. К о л ь т г о ф И. М., Л и п г о й н Д. Д. Полярография. Госхимиздат, 1948.
23. К о у з о в П. А. Очистка воздуха от пыли в циклонах. Изд-во ЛИОТ, 1938.
24. М а л о ф е е в а К. Т. Обогащение дробленых рядовых углей в гидроциклонах с целью получения малозольных концентратов. Труды института ВНИИУглеобогащение, вып. 30. Госгортехиздат, 1963.
25. М у з ы л е в Г. А. Обогащение угля в минеральной суспензии. Углетехиздат, 1954.
26. П и т е р е к и х Г. П., А н г е л о в А. И. Закономерности разделения минералов в тяжелых суспензиях в гидроциклонах. «Химическая промышленность», 1958, № 6.
27. П о в а р о в А. И. Гидроциклоны. Госгортехиздат, 1961.
28. Ф р у м к и н А. К., Б о л о ц к и й В. С. Кинетика электродных процессов. Изд-во Московского университета, 1952.
29. Ч а к р а в а р т и А. К., С а р к а р Г. Г., Л а х и р и А. Обогащение угольных пламов в водной среде в гидроциклонах. IV Международный конгресс по обогащению углей. Госгортехиздат, 1962.
30. B e l u g o u P., C h o w l o w s k y S. Revue de L'Industrie minerale, 1951, 31, N 566.
31. D e m e t e r L. Tanulmany a hidrociclon elme'letéröl, Banyaszati Lapok, 1954, 87, N 1.
32. D r i s s e n M. G. The use of hudraulic cyclones as thickeners and washers on modern coal preparation. Trans. A. I. M. G., 1948, 177 (240).
33. F i t c h E. B., J o h n s o n E. C. Controlling separations in liquid — solid cyclones. Chemical Engineering, 1952, 59, 56.
34. F i t c h E. B., J o h n s o n E. C. Operating behavior of liquid — solid cyclones, Mining Eng., 1953, 3, N 3 (304).
35. F o n t e i n F. I., D y k s m a n C. The hydrocyclone, its application and its explanation: «Recent Developments in Mineral Dressing» I. M. M. London, 1953.
36. F o n t e i n F. I., K r y g s m a n C. Fortschritte auf dem Gebiet der Sortierung in Zyklonen. Glückauf, 1955, Heft 29—30.
37. G r i n e r H. E. Le Ciclone epousseur, Revue de L'Industrie Minerale, 1951, 31, N 567.
38. K e l s a l l D. F. A study of the motion of solid particles in a hudraulic cyclone. Recent Developments in Minerale Dressing, I. M. M., London, 1953.
39. K e l s a l l D. F. Journal of the Chemical Metallurgical and Mining Society of South Africa, 1955, 56, IX, N 3.
40. K r i g g s m a n C. L'application des Hudrocyclones dans lec lavoirs a cho-robon. Revuede L'Industrie Minerale, 1951, 31, N 566.
41. T a r j a n G. An the Theory and use of the hudrocyclone, Achta Technica, 1953, 7, N 3—4.
42. T a r j a n G. Contribution to the kinematics of the hudrocyclone, Achta Technica 1957, 18, N 3—4.
43. T a r j a n G. Some Teoretical Questions on Classifing and Separating Hudro-cyclones, Achta Technica, 1961, 32, N 3—4.
44. T u z s o n I. Essai de synthese sur la theorie de l'hudrocyclone. Revue Generale de Me'canique 1955, 39, N 81—82.
45. V a n - d e r - W a l t P. I. A study of the operation of the cyclone washer and its application to Witbank fine coal. Journal of the Chemical Metal-lurgical and Mining Society of the South Africa, 1950, 51.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава I. Гидроциклоны, применяемые в углеобогащении	6
1. Гидроциклон и принцип его действия	6
2. Конструктивные разновидности гидроциклонов	8
Глава II. Давление жидкости в гидроциклоне	17
1. Потoki жидкости и характер их движения	17
2. Скорости движения жидкости	18
Глава III. Движение твердых частиц в гидроциклоне	40
1. Скорости движения твердых частиц	40
2. Анализ гидродинамических условий движения твердых частиц	51
Глава IV. Распределение минеральных зерен в гидроциклоне	60
1. Общие сведения	60
2. Закономерности распределения минеральных зерен	61
3. Анализ условий распределения минеральных зерен	71
Глава V. Основные факторы и их влияние на процесс обогащения в гидроциклоне	74
1. Общие сведения	74
2. Влияние давления	76
3. Влияние диаметров разгрузочных отверстий	79
4. Влияние длины сливной трубки	84
5. Влияние угла конусности	84
6. Влияние диаметра	86
7. Влияние нагрузки и других факторов	87
8. Принципы регулировки процесса разделения твердых частиц	89
Глава VI. Методика расчета гидроциклонов	92
1. Технологический расчет гидроциклона	92
2. Расчет основных размеров гидроциклона	100
Глава VII. Обогащение углей в гидроциклонах	105
1. Обогащение в тяжелых суспензиях	105
2. Обогащение в водной среде	132
Глава VIII. Классификация, сгущение и осветление в гидроциклонах	160
1. Классификация угля в гидроциклонах	160
2. Сгущение и осветление в гидроциклонах	163
Глава IX. Техничко-экономические показатели обогащения	168
Литература	176

Акопов Матвей Газарович

ОСНОВЫ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЕЙ
В ГИДРОЦИКЛОНАХ

Редактор издательства *Н. Т. Бащенко*

Технический редактор *Г. И. Колосова*

Корректор *В. П. Крымова*

Сдано в набор 9/VI 1966 г.

Подписано в печать 17/IV 1967 г.

Формат 60 × 90¹/₁₆. Бумага № 2. Печ. л. 11,25.

Уч.-изд. л. 11,82. Т-04851. Индекс 1-4-1.

Тираж 1500 экз. Заказ № 106/1923-11. Цена 86 коп.

Издательство «Недра».

Москва, К-12, Третьяковский пр., 1/19.

Ленинградская типография № 14

«Красный Печатник» Главполиграфпрома

Комитета по печати при Совете Министров СССР.

Московский проспект, 91.