Водная и воздушная сепарация при переработке кабеля

Михаил Федоровский
«Урбан Майнинг Техника»

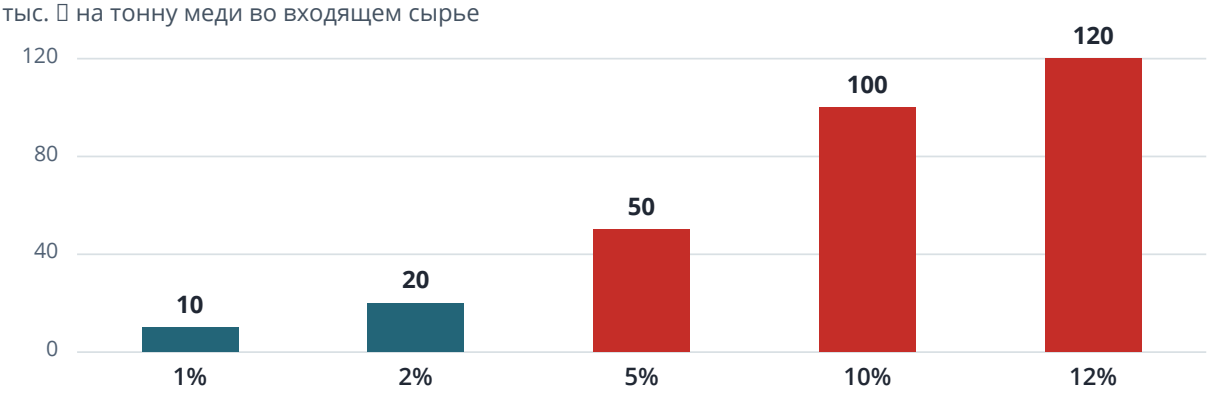
КЛЮЧЕВОЙ ВЫВОД

Воздушная (сухая) сепарация на денсиметрических столах сохраняет одно неоспоримое преимущество — отсутствие воды и сушки, благодаря чему товарная партия готова сразу после первого прохода. Однако её эффективность критически зависит от двух дорогостоящих и трудозатратных операций: предварительной сортировки сырья по толщине жилы и тонкого измельчения до 3–5 мм. Для тонких кабелей воздушная линия обрастает дополнительным оборудованием — турбомельницами, аспирацией, зигзаг-сепараторами или классификаторами по фракциям, — что значительно удорожает процесс. Водная сепарация устраняет необходимость сортировки, работает с крупными фракциями (10–50 мм) для толстожильного сырья и обеспечивает извлечение металла на уровне менее 1% потерь и высокую чистоту металлической фракции — практически без попадания полимера в металл. При современной цене меди даже 1% потерь означает прямые убытки порядка 10 000 рублей на тонну, а потери 5–12%, характерные для воздушной сепарации смешанного сырья, — 50 000–120 000 рублей на тонну. Это делает водную сепарацию экономически предпочтительной для предприятий, работающих со смешанным кабельным сырьём.

ГРАФИК 1

Стоимость потерь меди

тыс. ₽ на тонну меди во входящем сырье



Сценарный расчёт при цене 1 000 000 ₽ за тонну меди. По горизонтали — доля потерь меди.

01 Принципиальные различия в механике разделения

Обе технологии решают одну задачу — отделить медь или алюминий от полимерной изоляции после дробления кабеля. Разница заключается в среде, использующей различие плотностей материалов.

Воздушная сепарация (денсиметрические столы) — основной тип оборудования для сухого разделения кабеля. Измельчённая смесь подаётся на вибрирующую наклонную деку, через которую продувается воздух. Тяжёлые частицы меди (плотность ~8,96 г/см³) остаются на деке и движутся к выходу концентрата, лёгкий пластик (ПВХ ~1,4 г/см³, полиэтилен ~0,92 г/см³) «всплывает» в воздушном потоке и сбрасывается с другой стороны. Система требует мощной аспирации и пылеулавливания, поскольку работает с сухим измельчённым материалом.

Водная сепарация использует гравитационное осаждение в водной среде (вибростолы, гидроциклоны). Тяжёлая медь тонет, пластик всплывает или удерживается во взвеси. Вода также выполняет функцию отмывки поверхности от загрязнений, масел и клеевых составов.

02 Критический фактор №1: сортировка сырья по толщине жилы

Воздушная сепарация требует предварительной сортировки. Для эффективного разделения на денсиметрическом столе необходимо, чтобы частицы меди имели сопоставимую массу и аэродинамическое сопротивление. Если одновременно подать толстую и тонкую жилы, крупные тяжёлые частицы меди начинают активно вытеснять тонкую медь в пластиковую фракцию: на вибрирующей деке крупные частицы создают локальные зоны уплотнения и «толкают» мелкие частицы вверх, к выходу пластика. Тонкая медь теряется вместе с изоляцией.

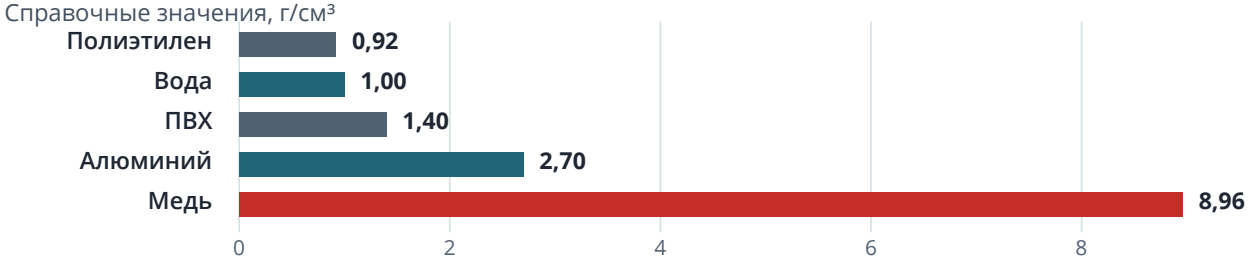
Поэтому при воздушной сепарации требуется предварительная сортировка кабеля по толщине жилы (тонкая многожилка, среднее сечение, силовой кабель). Эта операция дорогостоящая (требует дополнительного оборудования или ручного труда), трудозатратная (увеличивает штат и время обработки партии) и снижает гибкость предприятия, вынужденного накапливать однородные партии.

Водная сепарация не требует сортировки. В водной среде разделение происходит по плотности, а не по аэродинамике. Толстая и тонкая медь тонут с одинаковой скоростью, определяемой только плотностью материала (8,96 г/см³), а не размером частицы. Это позволяет одновременно перерабатывать все виды кабеля — от тонкой телефонной многожилки до крупного силового кабеля — в одном цикле, без предварительной сортировки.

ГРАФИК 2

Плотность металлов, полимеров и воды

Справочные значения, г/см³



Плотности полимеров зависят от состава. Плотность ПВХ на графике выше плотности воды.

03 Критический фактор №2: крупность измельчения и высвобождение металла

Главный принцип переработки кабеля — высвобождение металла из изоляции. Без этого никакая сепарация не даст результата: если металл не высвободился, он не уходит в отходы, а попадает в металлическую фракцию вместе с изоляцией — это называется недодроб. Недодроб снижает качество и цену полученного сырья: металлический концентрат оказывается загрязнён полимером, и плавильные заводы либо снижают цену, либо требуют дополнительной доработки. Крупность измельчения определяется именно задачей высвобождения металла.

Воздушная сепарация требует тонкого измельчения. Денсиметрические столы работают с фракциями 3–5 мм. При более крупном измельчении воздушный поток не способен стабильно разделять частицы — крупные куски меди и пластика ведут себя непредсказуемо, растут потери. Поэтому воздушная линия вынуждена использовать дробилки с мелкой фракционной решёткой, что означает повышенный расход электроэнергии, ускоренный износ ножей, риск перегрева и плавления пластика, а также невозможность перерабатывать крупные куски металла (алюминиевые радиаторы, разъёмы).

Водная сепарация работает с крупными фракциями, но требует измельчения для тонких кабелей. В водной среде разделение по плотности не зависит от размера частицы в той же степени, что в воздухе. Для толстых жил достаточно дробилки с решёткой 10–12 мм: металл уже высвобожден из изоляции, и водный сепаратор успешно разделяет куски 10–50 мм и более. Это позволяет:

- Перерабатывать СИП и получать длинные частицы алюминия (не гранулы, а кусочки), которые водный сепаратор успешно отсепарирует.
- Снизить энергозатраты на измельчение в разы для толстожильного сырья.
- Меньше изнашивать оборудование и проще его обслуживать.
- Перерабатывать смеси пластика и металла крупных размеров (30–50 мм) без сложностей.

Однако для тонких кабелей (витая пара, телефонные, компьютерные провода, тонкая многожилка) металл при крупном измельчении не выходит из изоляции — проводник остаётся внутри пластика, и сепарация неэффективна. Поэтому тонкое сырьё всё равно приходится измельчать до фракции 3–4 мм, чтобы высвободить металл. Это ограничение относится к любой технологии — и к воздушной, и к водной.

Ключевое отличие: даже на мелкой фракции (3–4 мм) водная сепарация остаётся эффективнее воздушной. В воде разделение по плотности стабильно и не зависит от аэродинамики, поэтому тонкая медь не теряется в пластике, а полимер не попадает в металл. Воздушный стол на той же фракции работает менее предсказуемо, чувствителен к пыли, влажности и загрязнениям, а частицы меди менее 0,5 мм вообще плохо улавливает. Таким образом, водная технология требует такого же измельчения для тонкого сырья, но даёт более высокое извлечение и чистоту на выходе.

04 Переработка тонких кабелей на воздушных сепараторах: возможна, но с оговорками

Существуют технологии переработки тонких кабелей и на воздушных сепараторах. Однако они требуют установки дополнительных турбомельниц (их также называют грануляторами или гриндерами), которые «подкручивают» волосяные жилки (0,1 мм и тоньше), придавая им форму, близкую к округлой. Именно это позволяет воздушному потоку более-менее стабильно выделять металл.

Без турбомельниц волосяные жилки с большой долей вероятности улетают в отходы вместе с пластиком: они спутываются в комки, не продвигаются вперёд по столу и теряются.

Турбомельницы дороги и энергозатратны — стоимость переработки значительно вырастает. Кроме того, к ним требуется дополнительная инфраструктура:

- Аспирация — ещё одна статья расходов на оборудование, энергию и обслуживание, дополнительно удорожающая весь процесс.
- Предварительное отделение крупного куска — без него турбомельница работает неэффективно. Это делает необходимым использование зигзаг-сепараторов или классификаторов по фракциям, что добавляет ещё один этап и ещё одно оборудование в технологическую цепочку.

Таким образом, переработка тонких кабелей на воздушной линии обрастает дополнительным оборудованием (турбомельницы, аспирация, зигзаг-сепараторы/классификаторы), дополнительными энергозатратами и дополнительными капитальными вложениями. Водная сепарация в этом смысле проще: ей не нужно придавать жилкам округлую форму — в воде разделение идёт по плотности, и спутанная тонкая жилка тонет так же, как и любая другая медная частица.

05 Критический фактор №3: чувствительность к типу сырья и чистота металлической фракции

Водная сепарация нечувствительна к толщине жилы. Можно перерабатывать любые виды кабеля — от супертонкой жилы (волосяной, 0,1 мм и тоньше) до крупного силового кабеля — в одном цикле без перенастройки.

Водная сепарация обеспечивает высокую чистоту металлической фракции. В водной среде разделение по плотности происходит стабильно и предсказуемо: тяжёлые частицы металла тонут, а полимер (ПВХ, полиэтилен, резина) всплывает или удерживается во взвеси. Благодаря этому водная технология практически исключает попадание полимера в металлическую фракцию. Это особенно проявляется при переработке:

- Тонких смешанных медных кабелей (витая пара, телефонные, компьютерные провода) — там, где воздушные столы теряют тонкую медь в пластике, водный сепаратор, наоборот, не пропускает пластик в металл.
- Алюминиевых кабелей всех видов — лёгкий алюминий (2,7 г/см³) в воздушном потоке ведёт себя нестабильно и легко увлекается вместе с пластиком; в воде же разница плотностей с ПВХ (1,4 г/см³) достаточна для чёткого разделения.

Результат — металлический концентрат с минимальным содержанием полимерных включений, который не требует дополнительной ручной доработки и реализуется по более высокой цене. Для алюминиевой гранулы это означает не только отсутствие меди, но и отсутствие пластика — то есть продукт, соответствующий требованиям плавильных заводов без дополнительной сортировки.

Тип сырья и чистота металлической фракции · продолжение

Водная сепарация эффективна для загрязнённого сырья. Замасленные кабели, кабели со смесями клея, гелевые заполнители — всё это перерабатывается в водной среде. На воздушном столе такое сырьё не просто требует постоянных остановок: металлические частицы слипаются с пластиковыми, взвесь становится плотной, и медь не продвигается вперёд по столу. Смешанные фракции слипаются и выпадают в отходы — отсюда высокие потери меди и загрязнённый металл на выходе. Разделение не происходит, качество низкое.

Водная сепарация разделяет медь и алюминий. Медные и алюминиевые радиаторы, разъёмы с латунными элементами — всё это можно измельчать и эффективно разделять в водной среде по плотности.

Водная сепарация — инструмент доработки потерь. Отдельный вариант использования этого оборудования — доработка пластиковых хвостов после воздушной сепарации: из них извлекается медь, которая ранее терялась.

06 Специфические ограничения воздушных денсиметрических столов

Помимо требований к сортировке, тонкому измельчению и дополнительному оборудованию для тонких кабелей, воздушные столы имеют ряд технологических ограничений:

- Пыль. Работа с сухим измельчённым материалом сопровождается интенсивным пылеобразованием. Требуется мощная аспирация и дорогостоящие рукавные фильтры. Пыль оседает на оборудовании и в помещении, увеличивая эксплуатационные расходы.
- Ограниченная производительность. Денсиметрические столы имеют меньшую пропускную способность по сравнению с водными сепараторами сопоставимого размера.
- Нечувствительность к мелким фракциям. Частицы меди размером менее 0,5 мм плохо улавливаются на воздушном столе и уходят в пластиковую фракцию — ещё одна причина потерь тонкой меди.
- Чувствительность к влажности и загрязнениям. Влажное, замасленное или липкое сырьё нарушает работу воздушного стола.

Главное преимущество воздушных столов — отсутствие воды и необходимости сушки. Товарная партия (медный концентрат и пластик) готова сразу после первого прохода. Нет затрат на обезвоживание, центрифугирование, термическую сушку и очистку сточных вод. Это делает воздушную сепарацию привлекательной для предприятий с ограниченным доступом к воде и для тех, кто ценит немедленную готовность продукта.

07 Водная сепарация как инструмент повышения сортности алюминиевой гранулы

Одно из ключевых преимуществ водной сепарации, которое часто остаётся в тени, — финальная доочистка алюминиевых гранул от включений меди и свинца.

При переработке алюминиевого кабеля в дроблёнке практически всегда присутствуют медные включения. Такая «загрязнённая» гранула стоит на рынке в среднем на 25% дешевле чистого алюминия. Для удаления меди теоретически можно использовать оптический сепаратор, однако он сложен в эксплуатации и крайне дорог. Водная сепарация предлагает альтернативу: за счёт разницы плотностей (алюминий ~2,7 г/см³, медь ~8,96 г/см³) отделить тяжёлые включения от алюминия без применения дорогостоящих оптических систем.

Практическое подтверждение. Российский производитель «Урбан Майнинг Техника» (UMTechnix) с 2025 года выпускает водные сепараторы (например, модель СМ 24.6 XL), которые позиционируются как инструмент переработки всех видов кабеля, включая сложные. В описании оборудования прямо указано: воздушные сепараторы не обеспечивают должного качества и скорости разделения — крупные частицы ПВХ попадают в алюминий, тогда как водный сепаратор «решает эти проблемы и даёт максимальный результат и качество без потерь металла», позволяя извлекать практически всю медь. Компания также имеет собственный опыт переработки: специалисты UMTechnix отмечают, что начинали с воздушной сепарации, но столкнулись с ограничениями при работе с тонким кабелем (витая пара, компьютерные, телефонные провода) и перешли к водным технологиям.

Таким образом, водная сепарация не только снижает потери металла, но и напрямую увеличивает стоимость товарной продукции — а наличие на рынке специализированных производителей, ориентированных именно на эту задачу, подтверждает её экономическую востребованность.

08 Экономическая цена потерь: 1% — это 10 000 рублей на тонну

При цене меди около 1 000 000 рублей за тонну (1 000 руб./кг) каждый процент потерь металла означает прямые убытки:

Потери меди	Убытки на тонну переработанного металла
1%	10 000 ₽
2%	20 000 ₽
5%	50 000 ₽
10%	100 000 ₽
12%	120 000 ₽

При воздушной сепарации смешанного сырья (без сортировки) потери тонкой меди могут достигать 5–12%, что при цене 1 000 000 рублей за тонну означает 50 000–120 000 рублей убытков на тонну переработанного металла. Даже «приемлемый» 1% потерь — это 10 000 рублей на тонну, что для предприятия с оборотом в тысячи тонн превращается в десятки миллионов рублей ежегодных потерь.

Водная сепарация, обеспечивая стабильное разделение независимо от толщины жилы и крупности фракции, сводит потери металла к минимуму (менее 1%).

09 Сравнительный анализ: преимущества и недостатки

Воздушная (сухая) сепарация на денсиметрических столах

Преимущества

- Отсутствие воды и сушки — товарная партия готова сразу после первого прохода.
- Низкая операционная стоимость (нет расходов на воду, водоочистку, сушку).
- Простота интеграции и обслуживания.
- Отсутствие риска окисления металла.

Недостатки

- Пыль — требуется мощная аспирация и дорогостоящие рукавные фильтры.
- Ограниченная производительность — меньшая пропускная способность по сравнению с водными сепараторами.
- Нечувствительность к мелким фракциям — частицы меди менее 0,5 мм теряются в пластике.
- Требует предварительной сортировки по толщине жилы.
- Требует тонкого измельчения (3–5 мм) — повышенный расход энергии, износ ножей, риск перегрева пластика.
- Не способна разделять крупные куски (10–50 мм) — невозможна переработка СИП, радиаторов, разъёмов без тонкого помола.
- Потери тонкой меди при смешанной подаче достигают 5–12% (50 000–120 000 рублей убытков на тонну при цене 1 000 000 руб./т).
- Полимер часто попадает в металлическую фракцию (особенно тонкие фракции).
- Загрязнённое сырьё (клей, гели, влага) нарушает разделение: металлические частицы слипаются с пластиковыми, взвесь становится плотной, медь не продвигается вперёд по столу, смешанные фракции слипаются и выпадают в отходы — высокие потери меди и загрязнённый металл на выходе.
- Для тонких кабелей требует дополнительных турбомельниц (грануляторов/гриндеров) — дорогих и энергозатратных; без них волосяные жилки спутываются и улетают в отходы с пластиком.
- Требует дополнительной инфраструктуры: аспирация (удорожание процесса) и предварительное отделение крупного куска (зигзаг-сепараторы или классификаторы по фракциям).

Водная сепарация

Преимущества

- Не требует сортировки по толщине жилы — все виды кабеля одновременно в одном цикле.
- Работает с крупными фракциями (10–50 мм) для толстожильного сырья — достаточно дробилки с решёткой 10–12 мм.
- Позволяет перерабатывать СИП и получать длинные частицы алюминия, успешно отсепарируемые.
- Разделяет смеси пластика и металла крупных размеров (30–50 мм).
- Нечувствительна к толщине жилы — от волосяной (0,1 мм и тоньше) до крупного силового кабеля.
- Обеспечивает высокую чистоту металлической фракции — полимер практически исключён в металлическом выходе, что особенно проявляется при переработке тонких смешанных медных кабелей и алюминиевых кабелей всех видов.
- Эффективна для загрязнённого сырья — замасленные, с клеевыми смесями, гелевые кабели: в водной среде слипание не препятствует разделению по плотности.
- Разделяет медь и алюминий — радиаторы, разъёмы с латунными элементами.
- Дорабатывает потери воздушных сепараторов — извлекает медь из пластиковых хвостов.
- Обеспечивает доочистку алюминиевой гранулы от меди, повышая её стоимость на 25%.
- Не требует турбомельниц и связанной инфраструктуры (аспирация, зигзаг-сепараторы/классификаторы) для тонких жил — спутанная волосяная жилка тонет в воде так же, как любая медная частица.
- Минимальные потери металла (менее 1%) — при цене 1 000 000 руб./т прямая экономия до 10 000 рублей на тонну.
- Упрощённая схема пылеулавливания.

Недостатки

- Затраты на сушку и обезвоживание продукции.
- Очистка сточных вод — только если у сепаратора нет оборотного водоснабжения.
- Коррозионный риск при хранении влажного металла.
- Более высокие капитальные затраты (водяной контур, насосы, отстойники).
- Невозможность работы в цеху при отрицательных температурах.

10 Области применения: когда что выбирать

Воздушная сепарация на денсиметрических столах оправдана, если:

- Сырьё уже отсортировано по толщине жилы и предварительно измельчено до 3–5 мм.
- Производство ориентировано на высокий объём однородного сырья.
- Критически важно отсутствие воды и сушки — товарная партия нужна немедленно.
- Отсутствуют жёсткие требования к чистоте металлической и пластиковой фракции.
- Доступ к воде ограничен или сброс стоков регулируется строго.
- Есть возможность установить и обслуживать дополнительное оборудование для тонких кабелей (турбомельницы, аспирация, зигзаг-сепараторы/классификаторы).

Водная сепарация целесообразна, если:

- Перерабатывается смешанное сырьё без сортировки — тонкие телефонные кабели, автомобильные жгуты, силовой кабель, гелевые кабели, СИП.
- Требуется крупное измельчение (10–50 мм) без тонкого помола для толстожильного сырья.
- Необходимо перерабатывать загрязнённое, замасленное сырьё и смеси с клеевыми составами.
- Требуется разделение меди и алюминия (радиаторы, разъёмы).
- Стоит задача доработки пластиковых хвостов после воздушных сепараторов.
- Требуется доочистка алюминиевой гранулы от меди для повышения сортности.
- Требуется максимальное извлечение металла (потери менее 1%) и высокая чистота металлической фракции.
- Имеется доступ к воде (или оборотное водоснабжение) и возможность работы в отапливаемом цеху.

11 Экспертная рекомендация

Анализ показывает, что водная сепарация является экономически предпочтительным решением для предприятий, работающих со смешанным кабельным сырьём. Она устраняет два дорогостоящих и трудозатратных этапа подготовки — сортировку по толщине жилы и тонкое измельчение для толстожильного сырья — и обеспечивает минимальные потери металла (менее 1% против 5–12% при воздушной сепарации смешанного сырья). При современной цене меди 1 000 000 руб./т это даёт прямую экономию до 10 000 рублей на тонну переработанного металла, а при потерях 5–12% воздушная линия теряет 50 000–120 000 рублей на тонну.

Кроме того, водная сепарация открывает возможности, недоступные воздушным столам: переработка СИП и крупных кусков алюминия без тонкого помола, разделение медно-алюминиевых радиаторов и разъёмов, переработка замасленного и загрязнённого сырья, доработка пластиковых хвостов после воздушных сепараторов и финальная доочистка алюминиевой гранулы от меди с повышением её стоимости на 25%. Отдельно стоит подчеркнуть высокую чистоту металлической фракции: водная технология практически исключает попадание полимера в металлический выход, что особенно важно при переработке тонких смешанных медных кабелей и алюминиевых кабелей всех видов.

Воздушная сепарация на денсиметрических столах сохраняет ключевое преимущество — отсутствие воды и сушки, благодаря чему товарная партия готова с первого прохода. Для предприятий с уже отсортированным однородным сырьём и ограниченным доступом к воде это может быть решающим фактором. Однако для тонких кабелей воздушная линия требует дополнительного оборудования — турбомельниц (дорогих и энергозатратных), аспирации и зигзаг-сепараторов или классификаторов по фракциям, — что значительно удорожает процесс и снижает его экономическую привлекательность. В условиях реального рынка, где сырьё поступает смешанным, водная сепарация обеспечивает максимальную гибкость, минимальные потери и премиальное качество продукта — три фактора, которые при текущих ценах на медь определяют рентабельность переработки.

Источники: данные производителей оборудования для переработки кабеля («Урбан Майнинг Техника»/UMTechnix), отраслевые обзоры по денсиметрической и водной сепарации, сравнительные анализы сухих и влажных грануляторов, текущие котировки меди.