

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПУЛЬПЫ

Инженерная оценка применимости и позиционирование Alia Density Meter (ADM)

Технический обзор для горно-обогатительных, гидрометаллургических и химических производств

Главный вывод ADM имеет наиболее сильную совокупность преимуществ там, где одновременно требуются измерение средней плотности по всему сечению, работа с абразивной пульпой, отсутствие радиоактивного источника и ремонтпригодный футерованный измерительный участок.

Сравниваемые группы методов

1. радиоизотопные (гамма-абсорбционные);
2. кориолисовые и вибрационные проточные;
3. вибрационные зондовые (камертонные);
4. ультразвуковые методы акустического импеданса и скорости звука;
5. микроволновые и электрические косвенные методы;
6. гидростатические, весовые и пробоотборные методы;
7. Alia ADM — динамическое измерение массы заполненного полнопроходного участка.

Версия 1.0 | 14 августа 2026 года

1. Область и критерии сравнения

Рассматривается непрерывное или квазинепрерывное измерение объёмной плотности пульпы непосредственно в технологическом потоке. Лабораторные методы включены как средство контроля и метрологической привязки, но не как полноценная замена поточному прибору.

Критерии, определяющие реальную пригодность

Группа	Что оценивается
Измерительная задача	Объёмная плотность смеси; при необходимости — расчёт массовой доли твёрдого при известных плотностях фаз.
Представительность	Точка у стенки, отдельная траектория, проба или усреднение по всему заполненному сечению.
Состояние потока	Полное заполнение, стратификация, осаждение, пульсации, пузырьки и пробки газа.
Среда	Абразивность, коррозионность, вязкость, гранулометрия, минералогический и химический состав.
Монтаж	Диаметр, прямые участки, потери давления, врезка, доступность и возможность остановки.
Эксплуатация	Износ, отложения, очистка, калибровка, ремонт на площадке, запасные части.
Метрология	Прослеживаемость, характеристика погрешности, повторяемость, контрольный метод и допуск в стране применения.
Безопасность и стоимость	Радиационные требования, обучение, разрешения, жизненный цикл и стоимость простоя.

Важно Плотность пульпы и массовая доля твёрдого — разные величины. Преобразование плотности в % твёрдого требует корректных плотностей жидкой и твёрдой фаз и предположения о двухфазности смеси.

2. Физический принцип Alia ADM

ADM формирует управляемое динамическое воздействие на заполненный измерительный участок трубопровода и по его механическому отклику определяет массу содержимого. При известном внутреннем объёме участка рассчитывается средняя объёмная плотность потока. В основе лежит связь силы, массы и ускорения: $F = m \cdot a$.

Что принципиально отличает ADM

Свойство	Инженерное значение
Полнопроходное измерение	Внутри потока нет вилки, зонда или сужающего устройства; оценивается заполненный объём измерительного участка.
Средняя плотность объёма	Результат менее зависит от локальной концентрации около стенки, чем у точечного зонда.
Сменная футеровка	Материал выбирается под абразивность и химический состав; изношенный элемент может быть заменён без замены всей измерительной системы.
Без радиоактивного источника	Нет источника ионизирующего излучения и связанных с ним процедур обращения, контроля и утилизации.
Широкие диаметры	Принцип применим к крупным пульпопроводам, где кориолисовый прибор может стать тяжёлым и дорогим.
Промышленный сигнал	Типовой аналоговый выход 4–20 мА; доступность иных интерфейсов подтверждается для выбранного исполнения.

Подтверждённые паспортные ориентиры

В доступном паспортном листе Alia указаны: максимальный диапазон 0–4 000 кг/м³; основная погрешность 0,5 % полной шкалы; повторяемость $\pm 0,1$ % полной шкалы; задержка сигнала 1 с; заводская трёхточечная калибровка и программная функция Tare. Конкретные температура, давление, диаметр и футеровка должны подтверждаться по актуальной спецификации выбранной модели.

Ограничение ADM измеряет фактическую плотность смеси, включая присутствующий газ. Пузырьки не следует объявлять «не влияющими»: они изменяют объёмную плотность и при неустойчивом газосодержании могут ухудшать повторяемость любого плотномера.

3. Сводное сравнение физических методов

Ниже сведены методы, реально применяемые или рассматриваемые для непрерывного контроля плотности минеральных и химических пульп.

Метод	Первичный измерительный признак	Сильная сторона	Ключевое ограничение
Alia ADM	Масса заполненного динамически возбуждаемого участка	Полнопроходное усреднение; сменная футеровка; без радиоизотопа	Полное заполнение; расчёт опор; выбор футеровки и монтажного исполнения
Радиоизотопный	Ослабление гамма-излучения	Наружный монтаж; экстремальные температура, давление и коррозия	Источник излучения; разрешения; влияние стенки, футеровки и отложений
Кориолисовый	Резонанс измерительных трубок	Высокая точность; одновременно массовый расход и плотность	Стоимость и масса растут с диаметром; эрозия трубок
Вибрационный зонд	Резонанс вилки/камертона	Компактность и простая врезка	Локальное измерение; износ, налипание, вязкость и крупные частицы
Ультразвуковой	Акустический импеданс / скорость звука	Безопасность; специальные исполнения для пульп	Зависимость от состава, температуры, газа и акустической модели
Микроволновый / электрический	Диэлектрические свойства / проводимость	Быстрый отклик при стабильном составе	Косвенная модель; химия, минералогия и температура требуют компенсации
Гидростатический / весовой	ΔP столба или масса известного объёма	Простой физический принцип; полезен как резервный контроль	Импульсные линии, заполнение, задержка, осаждение и сложность байпаса

4. Инженерная схема измерительного тракта

Схема разделяет технологический поток, физические измерительные признаки и уровень интеграции. ADM выделен как основной вариант для абразивной пульпы в заполненном трубопроводе.

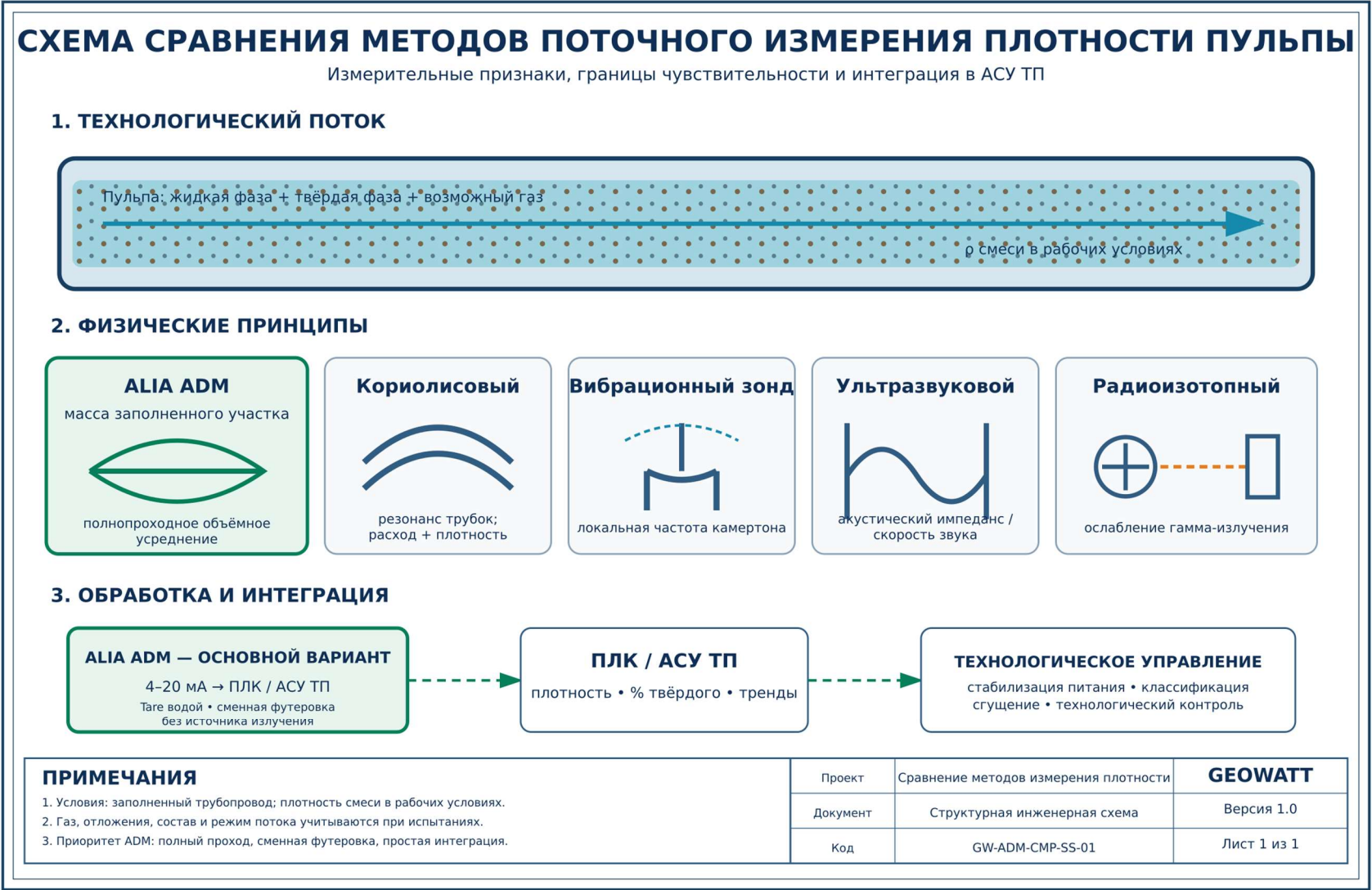


Рисунок 1 — Сравнение методов и рекомендуемый измерительный тракт ADM → ПЛК / АСУ ТП. Код схемы GW-ADM-CMP-SS-01.

5. Примеры приборных реализаций альтернативных принципов

Фотографии приведены для распознавания типов оборудования. Сравнение выполняется по физическому принципу и условиям процесса, а не по внешнему виду или отдельной модели.

Вибрационный зонд



Камертон погружён в поток. Частота зависит от плотности, но локальный чувствительный элемент контактирует с пульпой.

Endress+Hauser Liquiphant FTL51B Density

Кориолисовый прибор



Измерительные трубки колеблются; прибор одновременно определяет массовый расход, плотность и температуру.

Endress+Hauser Proline Promass F 300

Ультразвуковой прибор



Плотность вычисляется по акустическому отклику среды; требуется устойчивая акустическая модель состава пульпы.

Rhosonics SDM ECO

Инженерный вывод: для крупного диаметра и абразивной пульпы ADM устраняет погружённый чувствительный элемент и тонкие колеблющиеся измерительные трубки, сохраняя полнопроходное сечение и прямой выход 4–20 мА.

6. Итоговая матрица: измерительные свойства

Метод	Представительность	Абразивная пульпа	Газ / неполное заполнение
Alia ADM	Средняя масса заполненного участка; полный проход.	Высокая пригодность при правильно выбранной сменной футеровке.	Нужно полное заполнение; газ входит в измеряемую смесь.
Радиоизотопный	Одна или несколько лучевых траекторий.	Очень высокая; прибор не контактирует со средой.	Газ снижает измеренную плотность; геометрия фаз влияет на луч.
Кориолисовый	Плотность содержимого измерительных трубок.	От средней до высокой; зависит от скорости и износа трубок.	Чувствителен к режиму двухфазности, хотя специальные модели его обрабатывают.
Вибрационный зонд	Локальная зона около вилки.	Ограниченная при сильной абразивности и крупных частицах.	Газ и демпфирование колебаний могут создавать нестабильность.
Ультразвуковой	Локальный/траекторный акустический объём.	Высокая у специализированных исполнений.	Газ сильно влияет на акустику; отдельные модели работают при неполной трубе.
Микроволновый / электрический	Зависит от геометрии поля и модели.	Возможна при защищённом сенсоре.	Газ и изменение фазового состава требуют компенсации.
Гидростатический	Среднее по вертикальному столбу.	Хорошая при защищённых отборах.	Требуется стабильного заполнения и гидростатического режима.
Пробоотбор	Только качество отобранной пробы.	Не ограничен прибором, но высок риск нерепрезентативности.	Газ часто теряется при отборе; результат относится уже к пробе.

Оценка является инженерной и должна уточняться по конкретной среде, диапазону, диаметру и режиму потока.

7. Итоговая матрица: эксплуатация и интеграция

Метод	Монтаж / проход	Обслуживание	Регуляторная нагрузка
Alia ADM	Фланцевый измерительный участок; полный проход; требуется место и остановка для врезки.	Осмотр/замена футеровки, контроль Tagе, диагностика нуля.	Стандартный аналоговый канал; заводская калибровка, Tagе и контрольные испытания на объекте.
Радиоизотопный	Наружный монтаж; обычно без остановки и без потерь давления.	Контроль источника, затвора, детектора и геометрии; специализированный персонал.	Наибольшая: радиационная безопасность, разрешения, учёт, транспорт и утилизация.
Кориолисовый	Врезка; возможное сужение/потеря давления; вес и опоры.	Диагностика трубок, контроль эрозии и нуля.	Обычный метрологический маршрут; развитая международная база.
Вибрационный зонд	Врезка зонда; малая монтажная длина.	Очистка, контроль износа/налипания и ориентации.	Обычный метрологический маршрут.
Ультразвуковой	Зависит от конструкции: wafer, spool-piece или зонд.	Контроль сенсора, акустического контакта и калибровочной модели.	Обычный метрологический маршрут.
Косвенные электрические	Врезка или наружные электроды/антенны.	Очистка, повторная калибровка при изменении состава.	Обычный маршрут, но методика должна фиксировать состав среды.
Гидростатический	Два отбора давления / вертикальный участок.	Промывка и защита импульсных линий.	Обычный метрологический маршрут.
Пробоотбор	Пробоотборник и лаборатория.	Регулярный ручной труд и контроль процедуры.	Зависит от аттестованной методики, репрезентативности пробы и контроля лабораторной процедуры.

8. Метрология и подтверждение характеристик

Паспортная точность разных приборов часто выражается несопоставимо: процент показания, процент диапазона, абсолютная плотность или повторяемость. Поэтому выбор нельзя делать по одной цифре из каталога.

Минимальный метрологический пакет

8. Определить измеряемую величину: плотность смеси при рабочих условиях или приведённую плотность при заданной температуре.
9. Зафиксировать рабочий диапазон и требуемую допускаемую погрешность в единицах кг/м^3 , а не только в процентах.
10. Разделить основную погрешность, повторяемость, температурный/давленческий коэффициенты и долгосрочный дрейф.
11. Установить контрольный метод и порядок репрезентативного отбора пробы в той же временной точке.
12. Провести многоточечное сравнение минимум на воде и нескольких стабильных уровнях плотности в рабочем диапазоне.
13. Проверить влияние расхода, газосодержания, температуры, осаждения и изменения состава.
14. Сформировать бюджет неопределённости и критерии приемки, а затем определить периодический контроль.

Особенности ADM

15. Паспортная величина 0,5 % полной шкалы переводится в абсолютную погрешность выбранного диапазона; при приёмке результат подтверждается по контрольным точкам и сертификату заводской калибровки.
16. После монтажа или замены футеровки выполняется водяной Tare; сама процедура, допустимый результат и условия воды должны быть формализованы.
17. Заводская калибровка сопровождается документированной прослеживаемостью к единицам SI; на объекте формируется маршрут периодического контроля по принятой метрологической схеме.
18. Для технологического контроля критерии приёмки закрепляются в программе испытаний: диапазон, допускаемая абсолютная ошибка, повторяемость, Tare и периодический контроль.

Ключевой принцип Любой поточный плотномер следует оценивать не только по паспортной точности, но и по общей неопределённости в реальной неоднородной пульпе.

9. Преимущества ADM в потоке пульпы

Условие	Почему ADM имеет преимущество
Абразивная минеральная пульпа	Сменная футеровка принимает износ; в поток не выступает тонкий зонд или вибрирующая вилка.
Неоднородность по сечению	Измеряется масса заполненного участка, а не локальная точка около стенки.
Средние и большие диаметры	Не требуется сложная многотрубная кориолисовая конструкция; отсутствует радиоактивный лучевой тракт.
Отказ от радиоизотопов	Полностью исключается обращение с источником ионизирующего излучения.
Изменяющаяся проводимость/химия	Механический принцип не использует проводимость или диэлектрическую проницаемость как первичный признак.
Требование полнопроходности	Нет внутреннего зонда и дополнительного локального препятствия потоку.
Ремонт на площадке	Замена футеровки и повторный Tare потенциально дешевле замены всего измерительного сенсора.
Прямая интеграция в АСУ ТП	Стандартный токовый сигнал позволяет использовать обычный канал аналогового ввода.

Явные преимущества — без преувеличения

Для абразивной минеральной пульпы в заполненном трубопроводе ADM является приоритетным решением: он измеряет массу всего полнопроходного участка, не использует радиоактивный источник, работает со сменной футеровкой и передаёт плотность непосредственно в АСУ ТП. Альтернативные методы сохраняются в сравнении как специализированные варианты для иных исходных условий.

10. Алгоритм выбора и внедрения

19. Сформулировать задачу: технологический контроль, расчёт % твёрдого, материальный баланс или коммерческий учёт.
20. Определить среду и режим: плотности фаз, гранулометрия, вязкость, коррозия, температура, давление, газ и склонность к осаждению.
21. Проверить монтажные ограничения: диаметр, заполнение, прямые участки, остановка, место и несущая способность.
22. Исключить методы, физически несовместимые с процессом, до сравнения каталожной точности и цены.
23. Сравнить полную стоимость жизненного цикла: проектирование, разрешения, монтаж, калибровка, обслуживание, простой и утилизация.
24. Провести стендовое или промышленное сравнительное испытание с репрезентативным контрольным методом.
25. Зафиксировать метрологическую схему, критерии приемки и периодический контроль до закупки.

Рекомендация GeoWatt

Для типовой абразивной пульпы обогатительного или гидрометаллургического производства ADM следует включать в короткий список в первую очередь, если трубопровод заполнен, температура и давление укладываются в подтверждённое исполнение, а химически стойкая футеровка подобрана производителем.

Решение Сначала — компактный опросный лист и проверка применимости; затем — спецификация исполнения и метрологический маршрут; после этого — технико-коммерческое сравнение с радиоизотопным, кориолисовым и ультразвуковым вариантами.

11. Официальные источники и границы данных

Endress+Hauser. Liquiphant FTL51B Density with Density Calculator QML51, Technical Information TI01878FEN (2026): https://bdi-download.endress.com/file/f69c080300b9741d9e53b2db784cca2b/TI01878FEN_0326-00.pdf

Endress+Hauser. Proline Promass F 300, Technical Information TI01221DEN (2025): https://bdi-download.endress.com/file/4625dacd655954a9f42d0c0d4a6421e0/TI01221DEN_1325-00.pdf

Rhosonics. SDM ECO Brochure (2024): <https://rhosonics.com/wp-content/uploads/2024/04/SDM-ECO-Brochure-EN.pdf>

26. Alia Instruments. Non-nuclear density meters — product page: <https://aliainstruments.com/products/>

27. Alia Instruments. Datasheet (доступная редакция 2017): диапазон, погрешность, повторяемость, Tare, интерфейсы и типоразмеры: <https://aliainstruments.com/wp-content/uploads/2018/12/20180303-TUR-alia-instruments-datasheet-sm.pdf>

28. Endress+Hauser. Density Measurement for Quality Monitoring and Process Control — Coriolis, radiometric and vibronic principles: https://www.be.endress.com/_storage/asset/746815/storage/master/file/2658436/download/CP00024F00EN1310.pdf

29. Endress+Hauser. Gammapiot FMG50 — radiometric density measurement under extreme process conditions: <https://www.us.endress.com/en/field-instruments-overview/level-measurement/radiometric-level-gammapiot-fmg50>

30. IAEA. Radiation Safety in the Use of Nuclear Gauges / SSG-58: <https://www.iaea.org/newscenter/news/radiation-safety-in-use-of-nuclear-gauges-iaea-issues-recommendations>

31. Республика Казахстан. Закон «Об использовании атомной энергии» и правила обращения с радионуклидными источниками: <https://adilet.zan.kz/eng/docs/Z1600000442> ; <https://adilet.zan.kz/eng/docs/V1600013542>

32. NIST. Density Standards and Traceability — необходимость калибровки жидкостями известной плотности и прослеживаемости: <https://www.nist.gov/publications/chapter-4-density-standards-and-traceability>

33. OIML D 12. Fields of use of measuring instruments subject to verification — density and legal metrology: https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d012-e86.pdf

Граница применимости документа

Документ является инженерным сравнением методов и не заменяет техническую спецификацию изготовителя, методику поверки, проект привязки или заключение по химической совместимости. Числовые параметры должны подтверждаться актуальными документами конкретного исполнения на дату заказа.