

Алексеев Евгений Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИБОРА И МЕТОДА АНАЛИЗА
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ
СЛОЕВОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ ЧАСТИЦ**

05.17.08 – процессы и аппараты химических технологий

05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Росляк Александр Тихонович;
доктор технических наук, профессор
Квеско Наталия Геннадьевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Коробочкин Валерий Васильевич;

доктор физико-математических наук,
профессор
Архипов Владимир Афанасьевич

Ведущая организация: Сибирский физико-технический институт
Томского государственного университета

Защита состоится «19» декабря 2006 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.08 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «17» ноября 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.т.н.

_____ Петровская Т.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Анализ гранулометрического состава порошков является весьма распространенным методом исследований веществ, материалов и изделий, как при изучении окружающей среды, так и во многих технологических процессах.

В химических производствах удельная поверхность и размер частиц твердых компонентов определяют кинетику процессов и глубину превращения, однородность состава продуктов синтеза.

В геологии гранулометрический состав является основополагающей характеристикой осадочных пород, позволяющий провести правильную интерпретацию геофизических исследований, оценить емкостные и гидродинамические свойства коллекторов углеводородов, идентифицировать их по типу залежи.

В бурении скважин анализ гранулометрического состава шлама обеспечивает оценку качества проходки и скорости осаждения частиц в водной среде. Анализ размеров частиц буровых растворов позволяет оценить их устойчивость к расслоению и контролировать другие параметры.

Разработанный в начале 90-х годов прибор ВС-3, реализующий пофракционное осаждение частиц из стартового слоя, успешно используется для анализа гранулометрического состава порошков металлов, сплавов, органических и неорганических соединений в диапазоне 2 – 300 мкм. Вместе с тем накопленный опыт эксплуатации прибора выявил ряд проблем, решение которых определило необходимость существенного совершенствования прибора и программного обеспечения.

Таким образом, актуальность представленных в настоящей работе исследований обусловлена необходимостью совершенствования прибора и метода анализа гранулометрического состава порошков на основе слоевой седиментации частиц с целью расширения диапазона измерений, классов изучаемых материалов, применения современных электронных компонентов, программных средств, реализации технологии удаленного эксперимента.

Работа проводилась в Томском государственном университете и в Томском политехническом университете в рамках госбюджетной темы «Исследования механизмов взаимодействия рециркуляционных газовых потоков и субмикронных порошков, совмещенных с синтезом новых материалов» (ТГУ, Гос. рег. № 01.200.1 12393); проекта «Создание современной технологии производства и реализации защитных и декоративных покрытий на основе микродисперсных наполнителей из минерального сырья Сибири» в рамках научно-технической программы «Инновационная деятельность высшей школы». (ТПУ, код проекта 03.01.13); госбюджетной темы ЕЗН 2.07.2004. «Изучение гидродинамических и физико-механических процессов в условиях деформации и разрушения горных пород коллекторов с учетом фазовых переходов флюидов» (ТПУ);

Государственного контракта № 02.438.11.7040 от 06.03.2006 «Научно-организационное, методическое и техническое обеспечение организации и поддержки научно-образовательных центров в области разработки полезных ископаемых и осуществление на основе комплексного использования материально-технических и кадровых возможностей совместных исследований и разработок» в рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники» (ТПУ, Гос. рег. № 01 2006 07579).

Цель работы

Совершенствование метода анализа гранулометрического состава порошков на основе слоевой седиментации частиц, направленное на расширение диапазона размеров анализируемых частиц с учетом их формы, повышение точности измерений и математической интерпретации кривых накопления осадка, создание современного пользовательского интерфейса и программного обеспечения.

Основные задачи работы

1. Совершенствование аппаратной части прибора анализа гранулометрического состава порошков на основе слоевой седиментации.
2. Проектирование и разработка программной части комплекса на основе современных средств программирования.
3. Совершенствование методов аналитической аппроксимации кривых накопления осадка для определения гранулометрического состава материалов.
4. Экспериментальные исследования механизмов седиментации и разработка алгоритмов определения гранулометрического состава нетрадиционных для седиментационных измерений материалов (пластинчатых, игольчатых), полидисперсных.
5. Практическая реализация полученных результатов в производственных условиях, научных исследованиях и в учебном процессе.

Научная новизна

1. Установлено, что используя метод слоевого осаждения можно существенно расширить как диапазон измеряемых размеров частиц по сравнению с традиционным, так и классы порошков с различной плотностью и формой частиц за счет определения и ввода в расчетные модули соответствующих для данных частиц коэффициентов сопротивления.

2. Экспериментально подтверждено, что метод седиментации из стартового слоя может успешно применяться для специальных исследований, в частности изучения эффекта группового осаждения частиц, оценки устойчивости буровых растворов и моделирования других технологических процессов, связанных с седиментацией частиц.

3. Установлено, что применение метода аппроксимации кривых накопления осадка в виде рядов, составленных из известных аналитических представлений, позволяет определять и описывать гранулометрический

состав порошков с многомодальным распределением частиц по размерам.

4. Впервые совмещены процесс регистрации веса осадка и обработка результатов анализа гранулометрического состава порошков методом седиментации из стартового слоя в режиме реального времени.

Практическая значимость работы

1. Разработан программно-измерительный комплекс SDM-4 для анализа гранулометрического состава порошков методом слоевой седиментации с использованием современной элементной базы и средств объектно-ориентированного программирования.
2. Создано оригинальное программное обеспечение на основе среды программирования Delphi для статистической обработки данных анализа гранулометрического состава порошков и физически корректной аналитической аппроксимации кривых накопления осадка.
3. Впервые разработаны методики анализа гранулометрического состава порошков, состоящих из частиц неправильной формы.
4. Широкие возможности применения программно-измерительного комплекса SDM-4 как для анализа гранулометрического состава, так и для различных научных исследований, связанных с процессами седиментации частиц, обеспечивает его успешное практическое использование в заводских лабораториях, научно-исследовательских организациях, а также в учебном процессе, в том числе и в дистанционном образовании.

Реализация результатов работы

Усовершенствованный седиментометр ВС-4 используется в Сибирском физико-техническом институте Томского госуниверситета, на кафедре общей химии и технологии силикатов Томского политехнического университета, на кафедре бурения скважин Томского политехнического университета, в НИИ прикладной математики и механики Томского госуниверситета.

Автор защищает:

1. Методики определения гранулометрического состава материалов с различной плотностью, дисперсностью, формой частиц и полимодальным распределением методом весовой жидкостной седиментации из стартового слоя с помощью программно-измерительного комплекса SDM-4.
2. Усовершенствованный метод и прибор анализа гранулометрического состава порошков на основе седиментации из стартового слоя.
3. Комплекс программного обеспечения, реализующий функции проведения анализа гранулометрического состава порошков, управления экспериментом, статистической обработки данных анализа и вывода результатов.
4. Методики и программное обеспечение на основе информационных технологий, обеспечивающие удаленный доступ к проведению исследований с помощью программно-измерительного комплекса SDM-4.

Апробация работы

Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных и научно-технических конференциях:

- VI-я научная конференция по механике летательных аппаратов и современным материалам (г. Томск, 1999 г.);
- III всероссийская научная конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики" (г. Томск, 2002 г.);
- IV всероссийская научная конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики" (г. Томск, 2004 г.);
- X международный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2006 г.);
- V всероссийская научная конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики" (г. Томск, 2006 г.).

Разработки по теме диссертации экспонировались:

- на международной сибирской ярмарке-выставке "Нефть и газ – 2004" (Томск, 2004 г.);
- электронная копия проспекта прибора помещена в компьютерную сеть "Интернет".

Публикации

По теме диссертации опубликовано семь работ, сделано 5 докладов на конференциях.

Объем и структура диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Материал изложен на 140 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 5 таблиц; список использованных источников включает 95 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы для различных отраслей науки и техники, кратко излагаются цели и задачи исследований, новизна полученных результатов, их практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения о практической реализации результатов исследований.

В первой главе проанализированы современные тенденции развития методов и приборов гранулометрического анализа порошков, интерес к которым повышается в связи с внедрением и развитием во многих производственных процессах порошковых технологий, особенно с применением тонкодисперсных порошков.

Анализ гранулометрического состава дисперсных материалов относится к таким методам контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, в которых необходимо в одной пробе провести измерение размеров тысяч частиц. Причем, чем большее количество частиц измерено, тем точнее будут результаты анализа. Поэтому в анализе гранулометрического состава важны

не только точность измерения размеров, но и статистическая обработка данных анализа и их физически корректная аналитическая аппроксимация. Таким образом, компьютеризация аналитического оборудования по определению гранулометрического состава порошков, связанному с необходимостью накопления и обработки большого массива данных, стала безусловным требованием современной техники.

В настоящее время в диапазоне измеряемых размеров $> 0,5$ мкм наиболее широко распространены ситовой рассев, микроскопия, лазерная гранулометрия, седиментация. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, что и обуславливает их равноправное применение на практике.

Особенностью седиментационных методов является то, что определяемый с их помощью размер характеризует не только геометрические параметры частиц, но и учитывает их взаимодействие с дисперсионной средой через коэффициент сопротивления, что важно для многих процессов, связанных с получением и переработкой различных материалов в порошкообразном виде. Однако процесс седиментации в подавляющем большинстве случаев осуществляется из равномерно гомогенизированной суспензии, распределенной по всему объему осадительного сосуда, что делает начальный момент осаждения неопределенным и влияет на точность оценки количества крупных фракций.

В работе рассмотрен оригинальный метод седиментации частиц из так называемого стартового слоя. Создание на зеркале дисперсионной жидкости стартового слоя частиц обеспечивается сочетанием физических свойств двух жидкостей и их химическим взаимодействием. При этом, одной из жидкостей является седиментационная среда, а другая жидкость используется для ввода анализируемых частиц в эту среду.

Метод седиментации частиц из стартового слоя впервые использован в практической гранулометрии в весовом седиментометре ВС-3. Принцип работы и конструкция прибора обеспечивают непрерывное и прямое измерение массы частиц каждого размера. Размер частиц определяется по скорости их осаждения с использованием закона Стокса. Прибор через блок связи подключается к стандартному компьютеру, оснащенным программным обеспечением для операционной системы MS DOS.

В процессе всесторонних исследований и практической эксплуатации прибора ВС-3 выявлены следующие проблемы, которые определили необходимость существенного совершенствования седиментометра:

- устаревшая операционная система и, соответственно, устаревший интерфейс, процедуры накопления, обработки и выдачи информации;
- ограничения по весу анализируемой пробы и длительности анализа;
- математическое обеспечение не позволяет решить ряд задач, возникающих при анализе гранулометрического состава различных типов материалов.

В соответствии с выявленными недостатками в конце главы формулируются основные задачи совершенствования прибора и метода анализа гранулометрического состава порошков на основе слоевой седиментации частиц.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы гранулометрического анализа порошков методом слоевой седиментации частиц из стартового слоя. Основными измеряемыми величинами при гранулометрическом анализе являются размер частиц и их количество (число или масса частиц каждого измеряемого размера). Размер частиц при их осаждении в вязкой среде определяется с применением упрощенного уравнения движения Навье-Стокса при допущении существенного превалирования вязких сил над инерционными, когда значения числа Рейнольдса $Re < 1$

$$\frac{dw}{d\tau} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{me}} \right) - \frac{\zeta \rho w^2}{2m} f. \quad (1)$$

Если скорость осаждения частицы постоянна ($dw/d\tau = 0$), тогда при введении массы шарообразной частицы $m = (\pi \delta^3 / 6) \rho_{me}$ и площади поперечного сечения частицы $f = \pi \delta^2 / 4$ получим из равенства сил, действующих на частицу, выражение для скорости ее осаждения:

$$w_{oc} = \sqrt{\frac{4 (\rho_{me} - \rho) g \delta}{3 \rho \zeta}}, \quad (2)$$

где ρ_{me}, ρ – плотность частиц и седиментационной жидкости; ζ – коэффициент сопротивления.

Принцип действия весового седиментометра основан на непрерывном измерении во времени веса накопившегося осадка. Считая, что $w = const = H / t$, где H – высота осаждения, из (1) можно получить выражение для расчета в каждый момент времени t размера осевших частиц

$$\delta = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho}{(\rho_{me} - \rho)} \cdot \frac{\zeta}{g} \cdot \left(\frac{H}{t} \right)^2. \quad (3)$$

Из (3) видно, что при всех заданных величинах размер осевших частиц будет в первую очередь определяться коэффициентом сопротивления ζ , учитывающим гидродинамические характеристики движения твердой частицы в вязкой среде. Обычно при седиментационном анализе в качестве коэффициента сопротивления используется известный закон Стокса. Однако действие закона Стокса распространяется на движение частиц только очень малых размеров. Для расширения диапазонов размеров анализируемых частиц в разработанном программно-измерительном комплексе используются другие, нелинейные законы сопротивления, например формула Клячко.

Важной частью математического аппарата гранулометрического анализа

при седиментации является теоретическое описание кривых накопления аналитическими зависимостями, которых в настоящее время существует достаточно много. Обилие же существующих дисперсных материалов, разнообразие методов их получения и переработки, а также весьма широкий спектр их физико-механических свойств не позволяет создать универсальную зависимость, пригодную в равной степени для всех существующих материалов и процессов.

Наиболее известными из аналитических зависимостей считаются логарифмически-нормальный закон и обобщенный степенной, частным случаем которого является уравнение Розина-Раммлера, которое можно записать в виде

$$f(\delta) = baA \delta^{a-1} \exp(-b\delta^a), \quad (4)$$

где A – постоянная нормировки; a и b – параметры распределения.

В тех случаях, когда распределение частиц по размерам имеет две и более вероятных фракции, т.е. кривые $f(\delta)$ имеют два и более максимума, их аналитическое описание становится сложной задачей, поскольку традиционные выражения хорошо описывают классические распределения с одним выраженным максимумом. Для описания многомодальных распределений в чистом виде они не пригодны.

Практический опыт решения подобных задач позволил использовать для описания массового распределения частиц по размерам ряды, составленные из уже известных и практически проверенных законов, например, логарифмически-нормального с соответствующими масштабными множителями (долями), дисперсиями и медианами. Дифференциальная функция распределения частиц по размерам в данном случае будет выглядеть следующим образом

$$f(\delta) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\sqrt{2\pi\delta\sigma_i}} \exp\left[-\frac{(\ln\delta - \ln\delta_{0,i})^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (5)$$

где A_i – весовые множители; $\delta_{0,i}$ – медиана распределения; σ_i^2 – стандартное (среднеквадратическое) отклонение $\ln\delta$ от их среднего значения. Для определения неизвестных параметров ряда (A_i , $\delta_{0,i}$, σ_i^2) используется алгоритм оптимизации функции симплекс-методом.

В любом методе измерений при гранулометрическом анализе обязательным является статистическая обработка опытных данных. Оценка точности измерений осуществляется на основе анализа статистической обработки каждого j – го вариационного ряда массовых содержаний по опытам. Статистическая обработка экспериментальных данных, полученных на приборе ВС-4, предусматривает вычисление ряда статистических параметров распределений и критериев, на основании которых оценивается точность и достоверность результатов измерений.

Третья глава посвящена разработке программно-измерительного комплекса SDM-4, предназначенного для автоматизированного анализа гранулометрического состава различных материалов методом седиментации

частиц из стартового слоя в жидкости под действием гравитационных сил на базе весового седиментометра ВС-4.

Данный комплекс позволяет кроме стандартных функций, характерных для всех компьютеризированных приборов анализа гранулометрического состава:

- проводить расчет кривой осаждения во времени (седиментационной кривой накопления осадка) с учетом динамического взаимодействия частиц с чувствительным элементом и соответствующего коэффициента сопротивления;
- использовать различные аналитические зависимости для описания распределений частиц по размерам в соответствии с физически обоснованной аппроксимацией;
- при расчете распределения частиц по размерам, используя специальные методики, учитывать форму частиц;
- при подключении к сети Internet осуществлять удаленный доступ к экспериментальной базе данных и проведение дистанционных лабораторных работ.

Программно-измерительный комплекс SDM-4 (рис.1) включает:

- весовой седиментометр ВС-4;
- измерительную систему регистрации веса осадка;
- блок сопряжения прибора с компьютером (блок связи);
- компьютерное оборудование (сервер) с принтером и дисплеем.
- специализированное программное обеспечение.

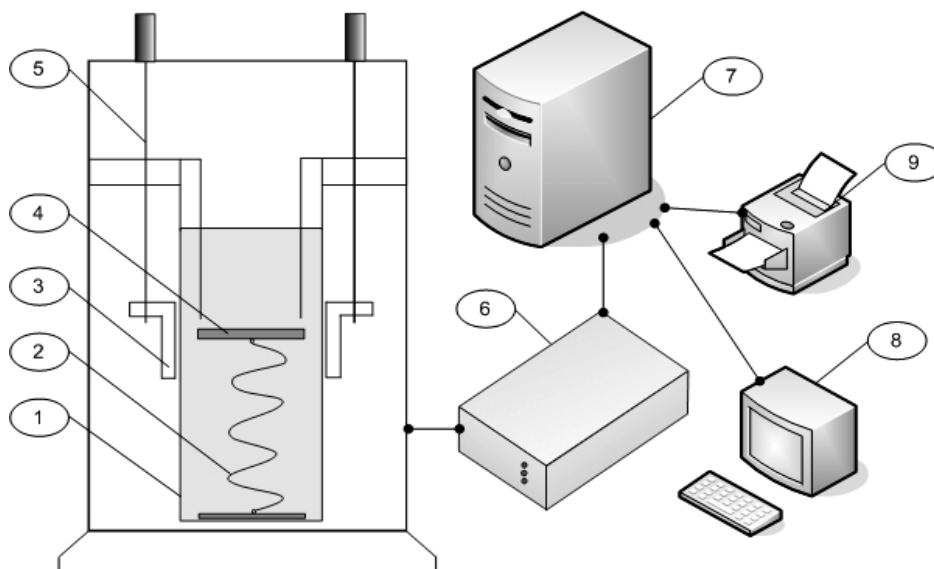


Рис. 1 Принципиальная схема программно-измерительного комплекса SDM-4

1 - осадительный сосуд; 2 - чувствительная система; 3 - датчик микроперемещений; 4 - чашка сбора осадка; 5 – штанги передвижения датчика относительно чашки; 6 - блок сопряжения седиментометра; 7 – сервер; 8 – дисплей; 9 – принтер

Измерительная система регистрации веса осадка состоит из цилиндрического осадительного сосуда (кюветы), чувствительного элемента и датчика микроперемещений. Чувствительный элемент содержит приемную

чашечку с поплавком и пружинным элементом. Чашечка сбора осадка чувствительного элемента является одновременно сердечником трансформаторного датчика микроперемещений. Перемещение катушки датчика относительно осадительного цилиндра осуществляется винтовыми штангами.

Блок сопряжения седиментометра ВС-4 предназначен для преобразования перемещения приемной чашечки в аналоговый электрический сигнал, дискретизации его 12-ти разрядным цифровым кодом, индикации уровня сигнала 3-х уровневым светодиодным табло, передачи полученного кода внешнему устройству (компьютеру).

Разработка новой модели седиментометра ВС-4 с применением современной элементной базы позволила на порядок увеличить диапазон измерения веса пробы до 250 мГ и расширить диапазон измеряемых размеров частиц от 1 до 300 мкм.

Программная часть SDM-4 выполнена в среде программирования Borland Delphi 7 и представляет собой программный комплекс, построенный из семи взаимосвязанных модулей: шесть основных, с которыми в основном работает пользователь, и один вспомогательный (рис.2).

Основные модули: настройка прибора, ввод начальных данных, модуль проведения анализа, модуль для проведения дистанционных лабораторных работ и два модуля работы с данными: один для проведения расчетов, другой для работы с базами данных и графиками осадконакопления. Вспомогательным модулем является «Справка» программы, в которой даются подробные сведения о назначении, работе, управлении, и возможностях SDM-4.

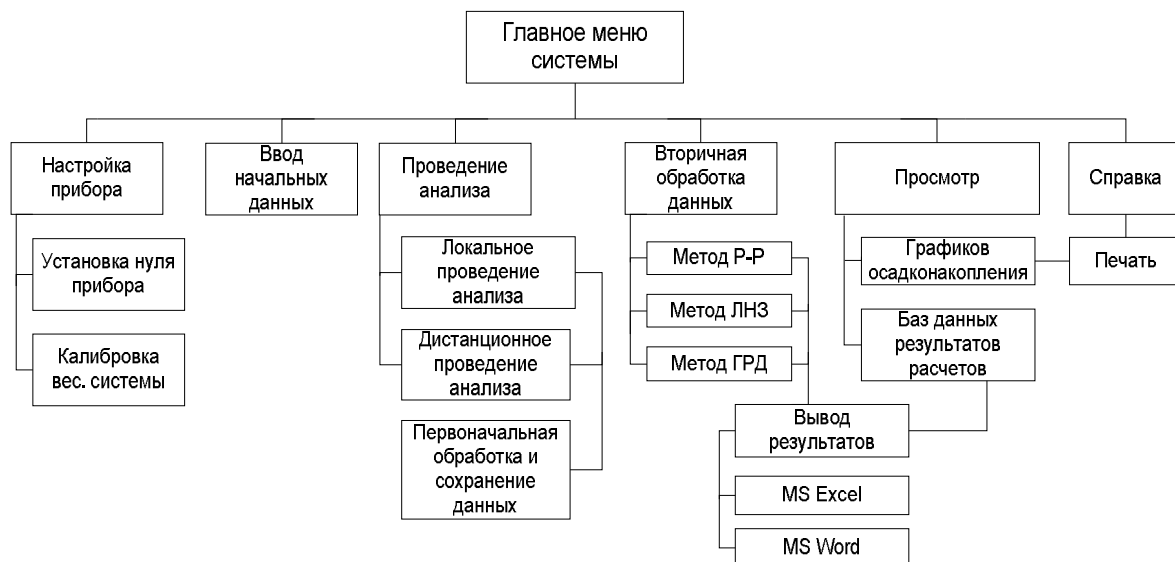


Рис. 2 Иерархическая структурная схема программного комплекса SDM-4

Для получения информации о гранулометрическом составе пробы и для дальнейшей статистической обработки данных полученная кумулятивная кривая описывается с помощью известных аппроксимационных формул и законов, используя функции модуля обработки данных. Для последующей работы с данными и вывода на печать в каждом из методов реализована

функция автоматизированного экспорта результатов расчетов и графиков распределений в электронные таблицы MS Excel (рис. 3) или в документ MS Word.

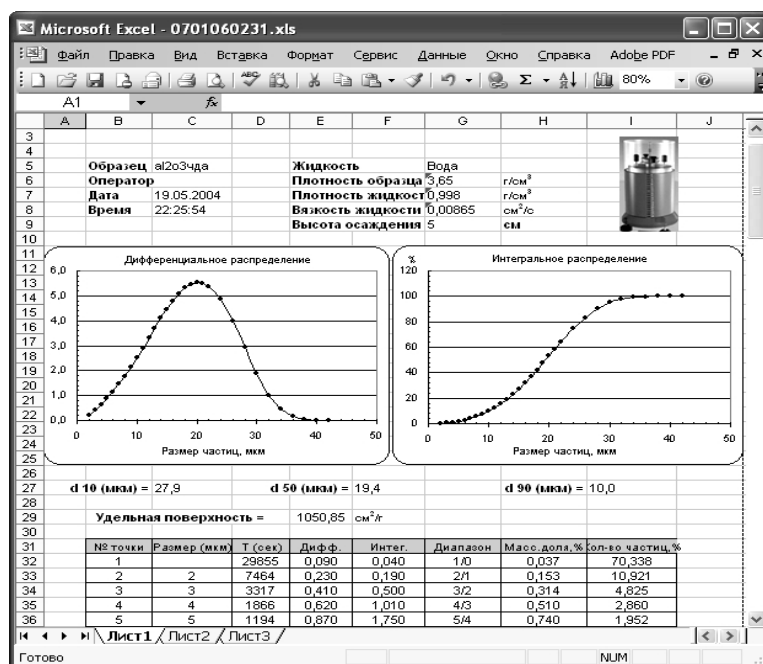


Рис. 3 Пример вывода результатов в таблице Excel

В четвертой главе приведена методика проведения гранулометрического анализа, включающая подготовку комплекса к работе, выбор оптимальных параметров (высоты осаждения, концентрации и объема пробы), подготовку и ввод пробы, обработку данных.

Функциональные возможности программно-измерительного комплекса SDM-4 позволили провести ряд исследований, направленных на создание методик анализа гранулометрического состава порошков с неправильной формой частиц, с полимодальным распределением, а также моделирования технологических процессов, связанных с седиментацией частиц.

Определение гранулометрического состава слюд затруднено из-за пластинчатой формы частиц. Единственным пригодным для этой цели методом анализа является трудоемкий метод оптической счетной микроскопии, причем пересчет численного распределения частиц в массовое в этом случае затруднен из-за отсутствия данных о толщине слюдяных пластинок. Применение в данной методике весового седиментометра ВС-4 помогает установить взаимосвязь между микроскопическим и седиментационным диаметрами частиц и отказаться от трудоемкого метода микроскопии.

В качестве исследуемого материала при разработке методики использовался тонкодисперсный порошок слюды. Для определения размеров частиц проводились серии опытов методом весовой гравитационной седиментации с использованием стартового слоя и микроскопический анализ того же порошка. На рис.4 представлено соотношение между седиментационным δ_s и микроскопическим δ_m диаметрами усреднённого

дисперсного состава слюды, описываемое уравнением

$$\frac{\delta_m}{\delta_s} = 3.53 \quad (6)$$

с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0.992$.

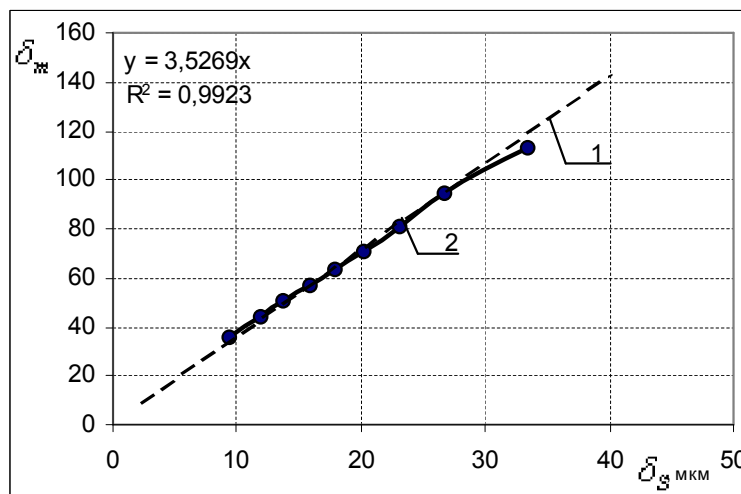


Рис 4. Соотношение между седиментационным δ_s и микроскопическим δ_m диаметрами усредненного дисперсного состава слюды.

1 - линия тренда; 2- экспериментальные данные

Установленные соотношения между седиментационным и микроскопическим диаметрами позволяют вычислить значения геометрического и динамического коэффициентов формы для частиц слюды по известным формулам.

Другим примером материала с неправильной формой частиц является волластонит. Частицы волластонита обладают игольчатой формой (рис.5) и анализ их методом оптической счетной микроскопии еще более затруднен по сравнению с частицами слюды, так как при такой форме частиц приходится замерять не один, а два характерных размера – длину и толщину.

Для определения размеров частиц проводились серии опытов с использованием весового седиментометра ВС-4 и микроскопический анализ нескольких партий волластонита. В результате исследований получены среднестатистические значения массового содержания частиц волластонита по стандартным диапазонам фракций в виде интегральных и дифференциальных кривых распределения.

В результате исследований построена зависимость седиментационного диаметра δ_s от микроскопического δ_m для усреднённого дисперсного состава волластонита (рис.6), описываемая уравнением

$$\frac{\delta_m}{\delta_s} = 1.4 \quad (7)$$

с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0.997$.

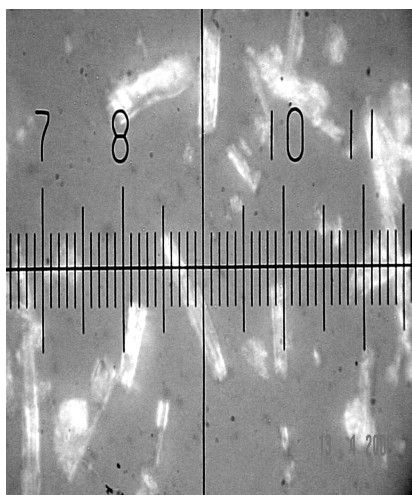


Рис. 5. Изображение частиц волластонита

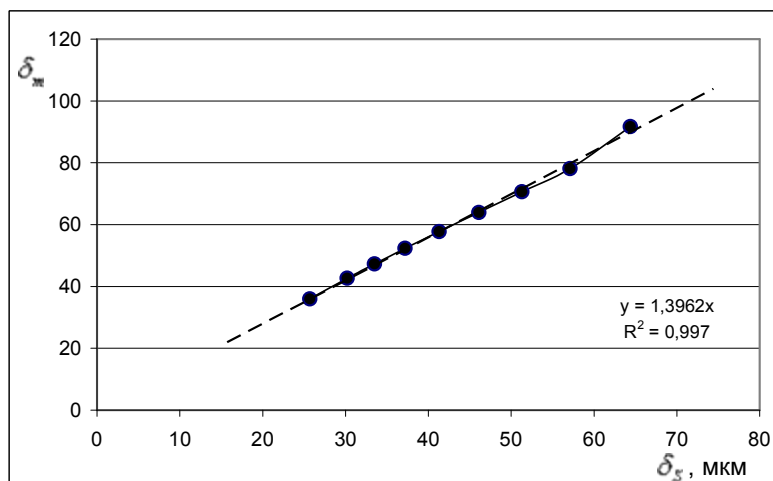


Рис. 6. Зависимость микроскопического δ_m диаметра от седиментационного δ_s

Обработка экспериментальных данных для определения связи средневзвешенного по числу частиц диаметра от длины частиц волластонита показала, что эта зависимость носит практически линейный характер и может быть описана уравнением

$$\frac{\delta_s}{l} = 0.07. \quad (8)$$

Проблема защиты персонала шахт от угольной пыли является сложной и актуальной задачей. Прежде всего, чтобы выбрать нужные средства защиты и оборудование необходимо провести ряд анализов и получить достоверный гранулометрический состав угольной пыли на различных участках производства.

Для определения гранулометрического анализа угольной пыли был использован программно-измерительный комплекс SDM-4. В качестве исследуемого материала использовались тонкодисперсные угольные порошки с плотностью $\sim 1.5 \text{ г/см}^3$.

Проведенные исследования показали, что процесс седиментации угольных частиц дает распределения частиц по размерам, хорошо описываемые логарифмически-нормальным законом. Применение данного метода расчета позволило получить интегральные и дифференциальные (рис.7) кривые распределения для частиц различных проб угольной пыли.

Как видно из приведенных кривых, распределение частиц по размерам является в основном бимодальным. Один максимум распределения находится в интервале от 1-5 мкм, другой в районе 5-25 мкм, причем массовое содержание частиц с размерами менее 5 мкм составляет от 8 до 45%. Таким образом, были получены результаты, позволившие оценить содержание тонкодисперсных частиц в угольной пыли.

Программно-измерительный комплекс SDM-4 успешно применялся для экспериментального изучения эффекта «группового» осаждения

тонкодисперсных частиц при решении задач гидродинамической очистки водных сооружений от загрязнений угледобывающих производств.

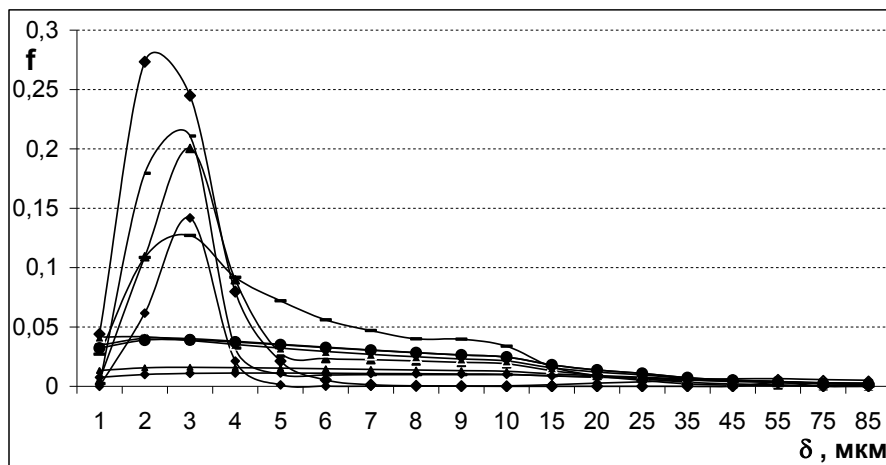


Рис. 7. Дифференциальные кривые распределения угольных частиц по размерам

Интерес к экспериментальному изучению эффекта “группового” осаждения тонкодисперсных частиц возник в связи ужесточением экологических требований на предприятиях угольной отрасли и необходимостью разработки нового эффективного метода очистки сточных шахтных вод от частиц угольного шлама.

Эффект заключается в том, что в месте с повышенной концентрацией частиц образуется «облако», которое за счет большей плотности оседает быстрее, чем частицы в местах с меньшей концентрацией. Проведенные исследования показали (рис.8), что при изменении величины объемной

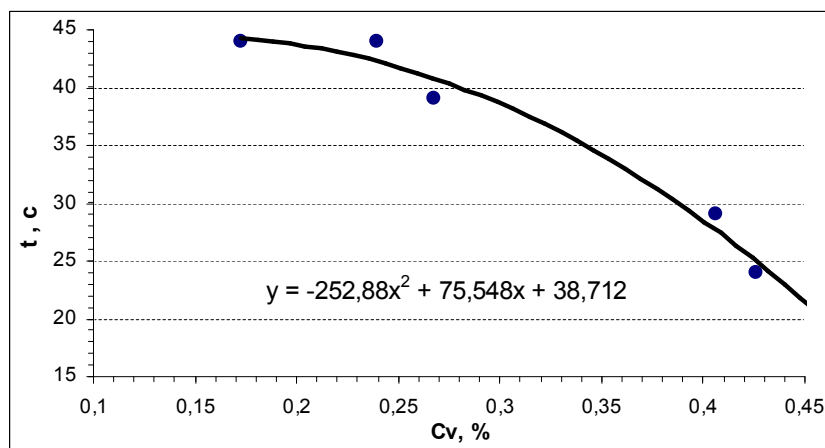


Рис. 8 Зависимость времени оседания частиц от величины объемной концентрации твердого компонента в стартовом слое

концентрации C_v от 0.24 - 0.43 %, наблюдается уменьшение времени осаждения частиц дисперсной фазы с 45 до 25 секунд, т.е. имеет место эффект «группового» осаждения.

Программно-измерительный комплекс может использоваться для создания компьютеризированных лабораторных практикумов и проведения научных экспериментов в реальном времени, когда пользователь

посредством Internet имеет возможность напрямую принять участие в самом эксперименте.

Во время удаленного эксперимента на стороне клиента происходит периодическая смена промежуточных графических и цифровых данных, позволяя пользователю непрерывно наблюдать за ходом эксперимента в реальном времени. По окончании анализа программный комплекс по заранее выбранным методам производит расчет необходимых параметров материала и заносит итоговые результаты по опыту в общую файловую базу данных на сервере, которой можно воспользоваться при проведении дальнейших лабораторных работ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам представленных в настоящем автореферате исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Применение более корректных методов математической обработки результатов измерений, учитывающих нелинейные законы сопротивления и форму частиц, математической аппроксимации с учетом многомодальности распределений, обеспечивает высокую точность анализа гранулометрического состава широкого класса порошков.

2. Исследования механизмов седиментации частиц существенно неправильной формы таких материалов как слюда, волластонит, угольная пыль на программно-измерительном комплексе SDM-4 позволили разработать оригинальные методики и программные алгоритмы анализа гранулометрического состава порошков таких материалов.

3. Исследование на приборе ВС-4 эффекта группового осаждения тонкодисперсных частиц показало, что с увеличением концентрации твердых частиц в стартовом слое скорость их осаждения пропорционально увеличивается. Таким образом, программно-измерительный комплекс SDM-4 может использоваться для моделирования технологических процессов, связанных с седиментацией частиц.

4. Создано программное обеспечение с использованием интегрированной среды разработки Borland Delphi 7 и пакета программ Microsoft Office для статистической обработки данных анализа гранулометрического состава порошков и аналитической аппроксимации кривых накопления осадка.

5. На основе нового программного обеспечения, современной элементной базы обработки сигнала и средств объектно-ориентированного программирования разработан программно-измерительный комплекс SDM-4 для анализа гранулометрического состава порошков методом слоевой седиментации.

6. Методика и программное обеспечение на основе информационных технологий в сфере Internet и коммуникаций обеспечивают удаленный доступ к проведению исследований на программно-измерительном комплексе SDM-4. Данный комплекс может успешно использоваться в

учебном процессе в качестве базового оборудования для ознакомления с основами гидродинамики и методами седиментации.

Основные публикации по теме диссертации

1. Алексеев Е.В., Дорофеев С.О., Квеско Н.Г. Использование метода весовой седиментации для экспериментального изучения стесненного осаждения частиц // Сборник докладов VI научной конференции по механике летательных аппаратов и современным материалам. Вып. 2, Томск, Изд-во Том. ун-та, 1999, с.89 – 90.

2. Алексеев Е.В., Росляк А.Т., Квеско Н.Г. Разработка компьютеризированного комплекса весовой седиментации частиц // Сборник научных статей ЦИОРАН Томского Университета «Исследования по баллистике и смежным вопросам механики». Вып. 5, Изд-во Том. ун-та, 2002, с.134 – 135.

3. Алексеев Е.В., Росляк А.Т., Квеско Н.Г., Ворошилов А.С. Исследование процесса седиментации угольных частиц применительно к анализу гранулометрического состава угольной пыли в шахтах // Доклады III всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 2002, с.203 – 204.

4. Алексеев Е.В., Росляк А.Т., Смоленик В.А. Разработка компьютеризированных комплексов для проведения виртуальных лабораторных работ // Открытое и дистанционное образование, 2004, № 2, Томск, с. 27 – 33.

5. Алексеев Е.В. Программно-измерительный комплекс анализа гранулометрического состава осадочных пород на основе седиментации частиц из стартового слоя // Материалы X международного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 2006 г., с. 385 – 386.

6. Вакалова Т.В., Погребенков В.М., Иванченков А.В., Алексеев Е.В. Влияние малых добавок топаза на синтез муллита в смесях каолинита с глиноземом// “Новые огнеупоры”, 2004, № 8, С. 49 – 53.

7. Вакалова Т.В., Погребенков В.М., Алексеев Е.В. Особенности синтеза муллита из оксидов в присутствии добавки топаза// “Новые огнеупоры”, 2004, № 9, С. 41– 47.