

На правах рукописи

Килимник Дмитрий Юрьевич

Разработка метода расчета скоростей седиментации
частиц в полидисперсной суспензии

25.00.36 Геоэкология

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2004

Работа выполнена на кафедре Экология и промышленная безопасность
Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Павлихин Геннадий Петрович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Семин Евгений Геннадиевич
- кандидат технических наук, доцент
Кисс Валерий Вячеславович

Ведущая организация – ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (Технический университет)»

Защита состоится ноября 2004 г. в часов на заседании диссертационного
совета Д 212.229.17 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет» по адресу: 195251 Санкт-Петербург
Политехническая улица, 29, гидрокорпус – 2, аудитория 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ
ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан 2004 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Орлов В.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из самых негативных последствий наблюдаемого в последние десятилетия роста населения нашей планеты и объёмов промышленного производства является постоянно возрастающее количество сбросов в геоэкологическую среду загрязняющих веществ. В результате этого возникает дефицит таких жизненно необходимых человечеству вещей, как чистая вода и чистая почва. Из-за применения некачественной воды в 4-5 раз увеличилась заболеваемость людей. Несмотря на то, что в России в последние десятилетия не наблюдается рост, ни численности населения, ни объёмов промышленного производства, Россия вносит достаточно значительный вклад в загрязнение окружающей среды. В России сбрасывается ежегодно около 76318 млн. кубометров сточных вод, из них 6366 млн. кубометров недостаточно очищены.

Таким образом весьма актуальной задачей является повышение качества и эффективности очистки сточных вод. Процесс очистки сточных вод является достаточно энергоёмким процессом, реализация которого требует больших капитальных вложений. Проблема повышения эффективности процессов очистки сточных вод, снижения текущих и капитальных затрат, снижение отводимых под очистные сооружения площадей является актуальной задачей, стоящей перед промышленными геоэкологами – разработчиками очистных сооружений.

Чистота воды и чистота почвы неразрывно связаны между собой. Состояние почв, грунтов имеет важнейшее значение для здоровья человека, так как почвы представляют тройной интерес: как начальное звено пищевых цепей, как интегральный показатель геоэкологического состояния окружающей среды и как источник вторичного загрязнения приземного слоя атмосферы, поверхностных и грунтовых вод.

При очистке загрязнённых вод и почв в качестве ступени механической очистки в настоящее время используются отстойные аппараты и гидроциклоны различных конструкций. Разработка теоретических основ расчёта как отстойников, так и гидроциклонных устройств позволяет наряду с

увеличением единичной мощности установок значительно интенсифицировать процесс сепарации и очистки веществ при оптимальных энергозатратах и минимальной материалоёмкости.

При расчете аппаратов разделения дисперсных сред проектировщики сталкиваются с необходимостью получения данных о скорости оседания (седиментации) частиц. Особую остроту эта проблема приобретает при проектировании очистных сооружений, в которых рабочей средой является полидисперсная суспензия.

Таким образом, разработка нового метода расчета скоростей седиментации частиц полидисперсной суспензии, позволяющего с большей точностью рассчитывать этот важнейший параметр для проектирования очистных сооружений, позволит производить более точные расчеты этих сооружений и, в конечном счете, приведет к повышению качества очистки сточных вод и почв, снижению финансовых затрат.

Цель работы: разработка метода расчёта скоростей осаждения частиц в концентрированной полидисперсной суспензии и уточнение методики расчёта аппаратов для разделения дисперсных систем, которые позволят учесть гидродинамическое взаимодействие между движущимися в аппарате частицами, что будет способствовать решению задачи охраны геоэкологической среды путём очистки загрязнённых почво-грунтов и вод.

Научная новизна. 1. Получены зависимости для определения скоростей осаждения (седиментации) частиц в концентрированной полидисперсной суспензии. 2. Получены экспериментальные значения скоростей седиментации частиц в зависимости от их концентрации и фракционного состава. 3. Предложены усовершенствованные методики расчёта отстойников и гидроциклонов.

Практическая значимость. Разработанная методика расчёта скоростей седиментации частиц полидисперсной суспензии может быть использована при конструировании новых или совершенствовании существующих аппаратов и сооружений для разделения дисперсных систем, в том числе гидроциклонов и отстойников, используемых в установках для очистки

загрязненных почв и вод. Эта методика может быть также использована при расчетах осадительного оборудования для разделения полидисперсных суспензий, когда возникает потребность определения гидравлической крупности частиц определённого размера. Предложенная методика расчета скорости седиментации позволяет разрабатывать новые методы повышения эффективности работы сепарационного оборудования путем варьирования параметрами суспензии (фракционным составом и/или концентрацией твёрдой фазы).

Реализация результатов работы. Методика расчёта разделяющей способности гидроциклонных аппаратов используется на кафедре Инженерной защиты окружающей среды (LUR) университета ФАУ Эрланген-Нюрнберг (FAU Erlangen-Nurnberg) при разработке очистных сооружений.

Автор защищает. 1. Расчётные зависимости, позволяющие определять скорость седиментации частиц с учётом их гидродинамического взаимодействия. 2. Результаты экспериментальных исследований процесса седиментации частиц молотого песка в воде при различных концентрациях и фракционных составах. 3. Уточнённые методики расчёта аппаратов для разделения дисперсных систем.

Достоверность научных результатов и основных выводов подтверждается __хорошим соответствием полученных теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными при помощи оригинальной методики с использованием оборудования последнего поколения.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации заключается в самостоятельной разработке экспериментальной методики расчета скоростей седиментации, выполнении по ней измерений, разработка математической модели седиментации частиц в полидисперсной суспензии произведена совместно с научным руководителем и ведущими специалистами в этой области – соавторами публикаций.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:
- Международной конференции «Экология речных бассейнов» (Владимир,

2002)

- Международной конференции Space-2003 (Москва-Калуга, 2003),
- Московской международной телекоммуникационной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь и наука» (<http://molod.mephi.ru/> 2003),
- Экологическом Форуме «Экобалтика-2004» (Санкт-Петербург).
- Рабочем заседании комиссии по технологии производственных процессов и аппаратов химической технологии (Баден-Баден, Германия, 2004),
- Пятой международной конференции по многофазным течениям ICMF'04 (Йокогама, Япония, 2004)
- семинарах кафедры «Экология и промышленная безопасность» (Э9) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2001-2004),
- семинарах на кафедры Инженерной защиты окружающей среды (LUR) университета ФАУ Эрланген-Нюрнберг (FAU Erlangen-Nurnberg) (Германия, 2001-2004),
- семинаре кафедры «Экологические основы природопользования» СПбГПУ (Санкт-Петербург, 2004)

Публикации. Основное содержание работы отражено в 8 работах.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста и содержит 61 рисунок; список литературы включает 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении показана актуальность задачи повышения качества и эффективности очистки сточных вод и загрязнённых почв. Приводится описание процесса механической очистки загрязнённых почв, при котором загрязненная почва предварительно смешивается с водой с образованием полидисперсной суспензии, а затем, в ходе процесса очистки из суспензии выделяется мелкодисперсная фракция, в которой концентрируется основная часть загрязнений. Показано, что основными аппаратами, используемыми для этих целей, являются отстойники и гидроциклоны.

В первой главе приведены применяемые в настоящее время методики расчётов отстойников и гидроциклонов. Показано, что основным параметром, используемым при расчёте, как отстойника, так и гидроциклона, является скорость седиментации взвешенной фазы. Точность расчёта этих устройств зависит в основном от точности определения скорости седиментации.

При расчёте отстойников скорость седиментации (гидравлическая крупность) рассчитывается на основании эмпирически полученных данных, соответствующих некоторым эталонным суспензиям. Использование при расчёте данных, характеризующих не рабочую суспензию, а суспензию, для которой есть данные в литературе, приводит к значительной погрешности в определяемой величине скорости седиментации. Проведение замеров на реальной суспензии, как правило, не представляется возможным.

При расчёте гидроциклона скорость седиментации отдельных частиц (радиального движения частиц твёрдой фазы) рассчитывается без учета параметров полидисперсности твёрдой фазы, т.е. пренебрегается гидродинамическим взаимодействием между движущимися частицами разных размеров.

В данной главе даётся подробный анализ работ, посвященных описанию процессов, происходящих в процессе осаждения одиночной частицы (Стокс, 1901), монодисперсного коллектива частиц (Лященко, 1940 и др.), би- и полидисперсной суспензии (Кумар, 2000, Герхарт, 2001, Дик, 2002 и др.). Особое внимание уделено анализу работ, посвящённых учёту гидродинамического взаимодействия между седиментирующимися частицами. На базе анализа выбрана наиболее достоверная формула, справедливая для монодисперсного облака частиц (Дик):

$$U_{\text{моно}} = \frac{ad^2}{18\mu} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) (1-c)^2 \left(1 - \frac{c}{0,6}\right)^{1,5},$$

(1)

где $U_{\text{моно}}$ – скорость седиментации частиц в концентрированной монодисперсной суспензии, a – ускорение (гравитационное или центробежное), м/с^2 , d – диаметр частицы, м, μ – динамическая вязкость

жидкости, Па·с, $\rho_{ж}$, $\rho_{ч}$ – плотности жидкости и частиц дисперсной фазы, кг/м³, c – объемная концентрация твёрдой фазы.

В этой главе описаны известные способы экспериментального определения скорости седиментации частиц в полидисперсной суспензии. Приведены экспериментальные данные, полученные различными авторами, показывающие существенное отличие измеренных значений скоростей, от посчитанных по известным формулам. При проведении экспериментов с полидисперсной твёрдой фазой это различие в наибольшей степени проявляется у частиц, размер которых менее среднего.

На основании всестороннего анализа современного состояния вопроса сформулированы цели исследования.

Вторая глава посвящена вопросам математического моделирования гидродинамических эффектов, возникающих при седиментации полидисперсного облака частиц. В работе рассматриваются два гидродинамических эффекта, имеющих место при седиментации би- и полидисперсных суспензий: влияние вытесняемого встречного потока жидкости, генерируемого оседающими частицами, и увлечение малых частиц крупными за счёт генерации встречного течения крупными частицами вблизи собственной поверхности.

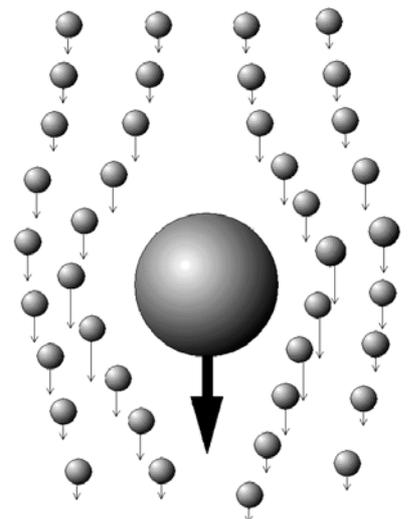
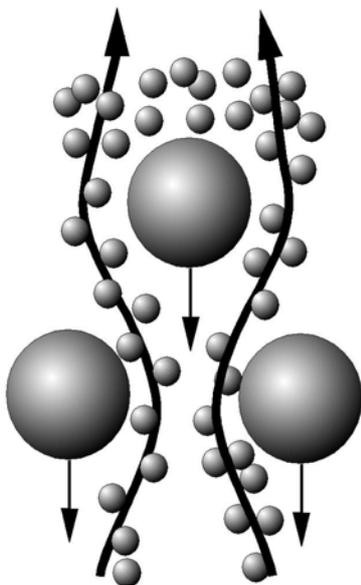


Рис. 1 Схематическое изображение
процесса вытеснения

Рис. 2 Схематическое изображение
процесса увлечения

Первый эффект присутствует и при седиментации монодисперсной суспензии, что учитывается формулой (1), но в случае полидисперсной суспензии этот процесс существенно отличается: при движении полидисперсного облака мелкие частицы могут приобретать не только заниженные, но даже отрицательные скорости, чего в принципе не может наблюдаться в монодисперсных суспензиях. Этот эффект возникает вследствие того, что движущиеся частицы приводят к встречному относительно направления седиментации движению жидкости, проявляющемуся за пределами гидродинамического пограничного слоя на частице (рис. 1).

Поправка к скорости седиментации, учитывающая влияние встречного потока жидкости выведена из условия сохранения суммарного объёма при движении частиц твердой фазы в жидкости. При этом реальная скорость частицы рассматривается как векторная сумма относительной и переносной скоростей. В результате получена формула для определения скорости седиментации, учитывающая влияние вытесняемого встречного потока жидкости: $U_i = U_{масс,i} - \sum c_j \cdot U_{масс,j}$ (2), где $U_{масс}$ - скорость седиментации частиц относительно жидкости, м/с, c - объемная концентрация частиц, i - индекс для малых частиц, j - индекс для крупных частиц.

Второй эффект способствует ускоренному осаждению мелкодисперсных частиц за счет беззахватного увлечения их проходящими вблизи крупными частицами, движущимися с большей скоростью (рис. 2). Очевидно, что данный эффект сильно чувствителен к полидисперсности суспензии. В монодисперсной суспензии, где нет ни крупных, ни мелких частиц, не будет и этого эффекта. Следовательно, чем шире (в разумных пределах) фракционный состав, тем сильнее данный эффект оказывает влияние на мелкодисперсную фазу полидисперсной суспензии, т.е. ускоряет ее осаждение.

Создание строгой математической модели процесса увлечения малых частиц крупными не представляется возможным из-за стохастического расположения частиц в суспензии. Поэтому поправка к скорости седиментации на увлечение малых частиц крупными выводится на основании упрощённой модели бидисперсной суспензии. Принято допущение о равномерности распределения всех частиц в жидкости. Весь объём суспензии разделён на ячейки, в каждой из которых находится только одна крупная частица. Вокруг крупной частицы выделен некоторый объём, такой, что все находящиеся в нём мелкие частицы полностью увлекаются крупной и, следовательно, седиментируют с её скоростью. Мелкие частицы вне этого объёма не испытывают влияния крупной частицы и седиментируют с собственной скоростью. Тогда средняя по ансамблю скорость седиментации мелких частиц, учитывающая эффект увлечения, определяется выражением:

$$U_{\text{уск, мал}} = U_{\text{моно}} \left[1 + Ac_{\text{кр}}^{1/3} \left(\frac{d_{\text{кр}}}{d_{\text{мал}}} \right)^2 \right], \quad \text{м/с, где } U_{\text{моно}} - \text{ скорость частицы в}$$

монодисперсии, м/с, A – коэффициент, $c_{\text{кр}}$ – объемная концентрация крупных частиц, $d_{\text{кр}}$, $d_{\text{мал}}$ – диаметры крупных и мелких частиц.

Для вывода аналогичной формулы для полидисперсной суспензии рассматриваются две произвольные фракции суспензии с номерами i и j , причем $d_i \geq d_j$. Увлечение частиц размером d_j частицами размером d_i

описывается формулой:
$$U_{\text{уск, } j} = U_{\text{моно, } j} \left(1 + Ac^{1/3} \frac{1}{d_j^2} \cdot \left(\sum_{i>j}^n d_i^6 \Delta m_i \right)^{1/3} \right), \quad \text{где } \Delta m_i -$$

объемная доля частиц i -ой фракции. Условие выбора номера фракции i для заданного значения j следующее: $d_i \geq \beta d_j$. Здесь A и β параметры, которые могут быть оценены теоретически только для бидисперсной суспензии ($A \approx 1,5$; $\beta \approx 15$).

Итоговая формула после введения в неё всех рассчитанных поправок выглядит следующим образом:

$$U = U'_{\text{моно}} \cdot \left[1 + Ac^{1/3} \cdot \frac{1}{d^2} \left(\sum_{d_i > \beta d_i}^n d_i^6 \Delta m_i \right)^{1/3} - c \cdot \sum_{k=1}^n \left(1 + Ac^{1/3} \cdot \frac{1}{d^2} \left(\sum_{d_i > \beta d_i}^n d_i^6 \Delta m_i \right)^{1/3} \right) \Delta m_k \right], (3)$$

$$) \text{ где } U'_{\text{моно}} = \frac{ad^2}{18\mu} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) (1-c) \left(1 - \frac{c}{0.6} \right)^{1.5}.$$

В таком виде формула удобна для расчета скоростей частиц в случае, если функция распределения частиц по размерам задана в табличном виде. Именно в таком виде функция распределения приводится в протоколе приборов по измерению фракционного состава. Однако дискретность функции вносит большую ошибку в значения скоростей особенно малых и средних фракций. Если измеренную функцию распределения частиц по размерам аппроксимировать в аналитическую зависимость, то формула приобретает следующий вид:

$$U = U'_{\text{моно}} \cdot \left[1 + Ac^{1/3} \cdot \frac{1}{d^2} \left(\int_{\beta d}^{\infty} r^6 q(r) dr \right)^{1/3} - c \cdot \int_0^{\infty} \left(1 + Ac^{1/3} \cdot \frac{1}{d^2} \left(\int_{\beta d}^{\infty} r^6 q(r) dr \right)^{1/3} \right) \cdot q(r) dt \right], (4)$$

)

где $q(r)$ – функция плотности распределения частиц по размерам.

При использовании в качестве функции распределения частиц по размерам функции вида РРСБ (RRSB): $q(r) = \frac{m}{d_*} \left(\frac{r}{d_*} \right)^{m-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{r}{d_*} \right)^m \right]$, где d_*

и m – параметры, зависимость для расчета скорости седиментации принимает вид:

$$U = U'_{\text{моно}} \cdot \left(\frac{d_*}{d} \right)^2 \left[\left(\frac{d}{d_*} \right)^2 + Ac^{1/3} \cdot \left(\int_{\left(\frac{\beta d}{d_*} \right)^m}^{\infty} \tau^{\frac{6}{m}} e^{-\tau} d\tau \right)^{1/3} - c \int_0^{\infty} \left(\frac{2}{\tau^m} + Ac^{1/3} \cdot \left(\int_{\left(\frac{\beta^m \tau}{d_*^m} \right)^m}^{\infty} \tau^{\frac{6}{m}} e^{-\tau} dt \right)^{1/3} \right) \cdot e^{-\tau} d\tau \right]. (5)$$

) В третьей главе описана методика экспериментального исследования скорости седиментации частиц в полидисперсной суспензии, подробно описаны использованное оборудование и материалы, приведены расчеты погрешностей и результаты экспериментального исследования. Экспериментальные исследования проведены с целью: 1. получения

достаточного экспериментального материала для определения параметров A и β формул (3-5); 2. экспериментальной проверки полученных зависимостей для расчёта скоростей оседания различных частиц полидисперсной суспензии.

Цели экспериментального исследования достигнуты путём проведения серии седиментационных экспериментов. Методика эксперимента основана на полевой теории Кинча. Эксперимент проводился в поле действия центробежной силы и реализован в лабораторной тарельчатой центрифуге радиусом $R_{ц}=0.08$ м и со скоростью вращения $n=750$ об/мин. Взятие проб из объема вращающейся центрифуги через определенные моменты времени на определенном радиусе и исследование этих проб на содержание в них твердых частиц позволяют судить о скоростях седиментации. Согласно этой методике пробы необходимо исследовать на концентрацию твёрдой фазы и на функцию распределения частиц по размерам. С помощью этих параметров рассчитываются частные концентрации отдельных фракций твёрдой фазы, что позволяет рассчитать скорости седиментации этих фракций по формуле, полученной на основании теории Кинча $U_i = -\frac{R_{np}}{2(t_k - t_{k-1})} \ln \frac{c_{i,t_k}}{c_{i,t_{k-1}}}$, где R_{np} - расстояние от центра аппарата до наблюдаемой частицы, м, t_k и t_{k-1} - моменты времени взятия пробы, $c_i = c \cdot \Delta m_i$.

Рабочей суспензией в экспериментах являлась смесь воды и молотого песка. Для выполнения поставленных целей экспериментального исследования эксперименты проведены с двумя различными фракционными составами, различающимися своей полидисперсностью (SF-500: $d_{50}=5,4$ мкм, $d_{90}/d_{10}=10$; SF-800; $d_{50}=2,3$ мкм, $d_{90}/d_{10}=5$). С каждым типом твёрдой фазы проведены эксперименты во всем диапазоне возможных концентраций (объемной) – от 0,8 до 25 процентов.

Для измерения распределения частиц по размерам в пробах, отобранных в ходе эксперимента, использовано специальное оборудование – лазерный дифракционный гранулометрический анализатор фирмы Малверн (Великобритания). Особенностью этого прибора является то, что результаты замеров фракционного состава выдаются в виде таблицы объёмных долей

фракций твердой фазы, причем количество градаций от 50 до 100.

Проведенные эксперименты подтвердили существование явления аномального увеличения скорости осаждения мелкодисперсной фракции полидисперсной суспензии (рис. 3,4). Кроме того была экспериментально установлена зависимость скорости седиментации частиц диаметром менее 2мкм от концентрации и фракционного состава всей твердой фазы.

Определение параметров A и β осуществлено по экспериментальным данным, полученным для одного из фракционных составов (SF-500). Для каждого значения общей концентрации определяется своя пара параметров A и β . Это сочетание параметров A и β определено из условия обеспечения минимума усреднённой по диаметру частиц погрешности расчета скорости седиментации при заданной концентрации и заданном фракционном составе. Расчёт оптимального сочетания A и β произведён по специально созданному алгоритму на ПЭВМ.

Установлено, что значения параметра β практически не изменяются при изменении общей концентрации и лежат в диапазоне значений 15 ± 2 . Поэтому значение параметра β можно принимать всегда равным 15. Установлено также, что параметр A существенно зависит от концентрации. Предложена аналитическая зависимость значения параметра A от концентрации в виде

$$A = 2,5 \cdot c^{\frac{1}{3}} \cdot e^{-\left(\frac{c}{0,2}\right)}.$$

Окончательно формула для расчёта скорости седиментации выглядит следующим образом:

$$U_i = \frac{d^2 a}{18\mu} (\rho_s - \rho_{ж}) (1-c) \left(1 - \frac{c}{0.6}\right)^{1.5} \left(\frac{d_*}{d}\right)^2 \left[\left(\frac{d}{d_*}\right)^2 + 2,5 \cdot c^{\frac{2}{3}} \cdot e^{-5c} \cdot \left(\int_{\left(\frac{15d}{d_*}\right)^m}^{\infty} \tau^{\frac{6}{m}} e^{-\tau} d\tau \right)^{1/3} - c \int_0^{\infty} \left[\tau^{\frac{2}{m}} + 2,5 \cdot c^{\frac{2}{3}} \cdot e^{-5c} \cdot \left(\int_{(15^m t)}^{\infty} \tau^{\frac{6}{m}} e^{-\tau} dt \right)^{1/3} \right] \cdot e^{-\tau} d\tau \right]. \quad (6)$$

На рис. 3 изображены кривые, отображающие зависимости скорости седиментации от размера частицы: сплошные – рассчитанные по формуле (6) с привлечением полученных параметров A и β , а с выделенными точками – экспериментальные. Видно, что оптимизация параметров A и β позволила достигнуть хорошего совпадения значений, подсчитанных по формуле (6) с экспериментальными значениями.

Для проверки универсальности полученной зависимости и возможности её использования для суспензий с другими параметрами произведено сравнение скоростей седиментации, рассчитанных по полученной формуле для различных размеров частиц в диапазоне изменения концентраций с экспериментально полученными значениями с использованием другого фракционного состава. Результаты расчета и экспериментальные данные скоростей седиментации частиц смеси SF-800 приведены на рис. 4. Видно хорошее совпадение экспериментальных и теоретических значений. Кроме того, экспериментально подтверждается зависимость скорости седиментации от фракционного состава. При сравнении рис. 3 с рис. 4 видна значительная разница между значениями, соответствующими одной и той же концентрации.

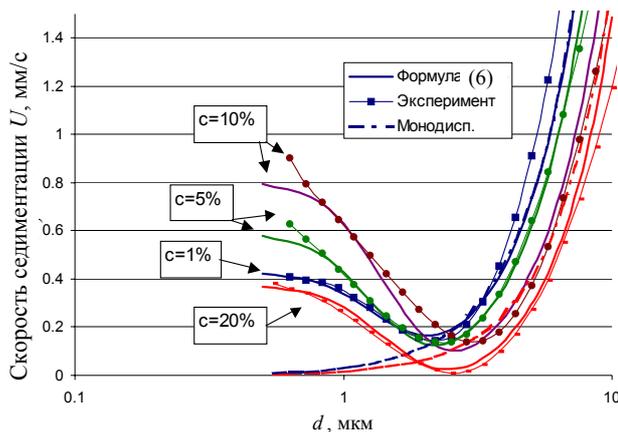


Рис. 3 Теоретические и экспериментальные значения скорости седиментации для различных концентраций твёрдой фазы (SF-500)

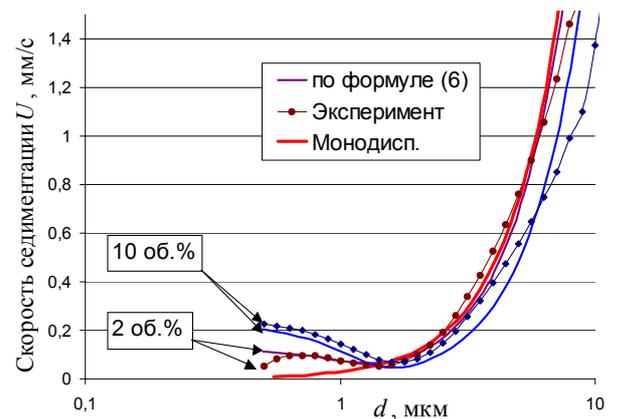


Рис. 4 Теоретические и экспериментальные значения скорости седиментации для различных концентраций твёрдой фазы (SF-800)

Таким образом, показано, что предложенные зависимости достаточно корректны и позволяют рассчитывать скорости седиментации с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Четвёртая глава посвящена описанию применения полученных зависимостей для расчёта скоростей седиментации. В первом параграфе главы показано как может быть уточнена методика расчёта разделяющей способности гидроциклона. Уточнённая формула Шуберта-Неессе для расчёта функции разделения гидроциклона выглядит следующим образом:

$$T = \frac{1}{1 + S \exp \left[-\frac{R_{ц}}{D} \cdot U_{моно,i} \cdot \left(\frac{d_*}{d}\right)^2 \left[\left(\frac{d}{d_*}\right)^2 + Ac^{1/3} \cdot \left(\int_{\left(\frac{d}{d_*}\right)^m}^{\infty} \tau^{\frac{6}{m}} e^{-t} d\tau \right)^{1/3} - c \int_0^{\infty} \left(\tau^{\frac{2}{m}} + Ac^{1/3} \cdot \left(\int_{\left(\frac{d}{d_*}\right)^m}^{\infty} \tau^{\frac{6}{m}} e^{-t} dt \right)^{1/3} \right) \cdot e^{-t} d\tau \right]} \right]}$$

(7), где S – отношение расходов через верхний и нижний сливы,

$$A = 2,5 \cdot c^{\frac{1}{3}} \cdot e^{-\left(\frac{c}{0,2}\right)}, U_{моно,i} = \frac{R_{ц} d^2 \omega^2}{18\mu} (\rho_{ц} - \rho_{ж}) (1-c) \left(1 - \frac{c}{0,6}\right)^{1,5}, R_{ц} - \text{радиус циклона,}$$

ω - угловая скорость вращения потока внутри гидроциклона $\omega = \frac{u_{тан}}{2\pi R_{ц}}$, $u_{тан}$ –

тангенциальная скорость

$$\text{потока } u_{тан} \approx \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{ж}}}, \Delta p -$$

падение давления в

гидроциклоне, D –

коэффициент турбулентной диффузии.

Полученная формула проверена путём сравнения функции разделения $T(d)$, рассчитанной по полученной методике, с экспериментальными

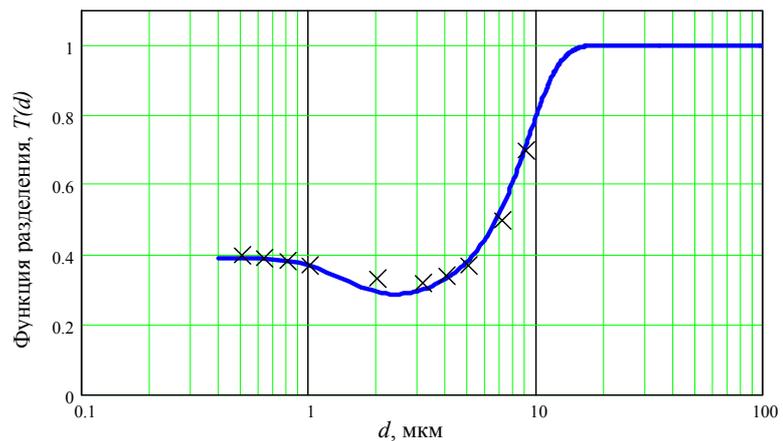


Рис. 5 Экспериментальные значения функции разделения 25мм-гидроциклона (наименование твёрдой фазы – QM14 ($d_*=5,5$; $m=1,5$), $c=4\text{об.}\%$, $S=3$) и кривая построенная по формуле (7)

данными, приведенными в литературе (Герхарт, 2001) (рис. 5). Используются данные для 25-мм гидроциклона ($S=3$), работающего под давлением $\Delta p=1,5 \cdot 10^5$ Па с суспензией молотого песка ($d^*=5,5$ мкм; $m=1,5$; $\rho_{\text{ч}}=2500$ кг/м³) при объемной концентрации $c=5\%$. Видно, что посчитанные значения хорошо согласуются с экспериментальными даже в области малых частиц, где наблюдается подъём кривой с падением размера частиц – т.н. фиш-хук-эффект (Fish-Hook-Effekt). Этот эффект наблюдался многими экспериментаторами при определённых параметрах работы гидроциклона. При этом, при построении аналогичного графика с использованием ранее известных методик расчёта этот эффект никогда не наблюдался.

Второй параграф главы посвящен описанию применения формулы для расчёта скорости седиментации частиц полидисперсной суспензии при расчёте и повышении эффективности осадительного оборудования.

Размеры отстойников рассчитывают на основании скорости осаждения (гидравлической крупности) и требуемой степени очистки. (скорости седиментации). При проектировании отстойника для осаждения конкретного дисперсного состава позволит более точно подобрать размеры отстойника. Отстойник, рассчитанный для конкретной суспензии, будет оптимально подходить для заданного процесса, т.е. будет ни слишком большим, что привело бы к нерациональному использованию основных средств и площади предприятия, ни слишком малым, что могло быть причиной недостаточной эффективности установки.

Кроме улучшения качества выбора параметров отстойника, разработанная теория седиментации позволяет в некоторых случаях значительно интенсифицировать процесс отстаивания. Показано, что скорость частицы конкретного размера может сильно зависеть от концентрации твердой фракции и от наличия частиц других размеров (от фракционного состава) (рис. 3, 4). Скорость частицы размером 1 мкм при нахождении её в разных фракционных составах и при различных концентрациях различается в несколько раз. Т.е., расширяя фракционный состав оседающего взвешенного вещества, либо изменяя его концентрацию имеем возможность ускорить

седиментацию частиц, размер которых меньше 2 мкм.

Время отстаивания полидисперсной суспензии рассчитывается по фракции, имеющей минимальную гидравлическую крупность. При этом считалось, что чем меньше размер частицы, тем меньше и гидравлическая крупность. Как показали исследования, в определённых случаях, это не так. Самые малые частицы могут иметь гидравлическую крупность значительно больше, чем частицы большего размера этой же суспензии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчёта скорости седиментации частиц, учитывающая гидродинамическое взаимодействие между частицами, составляющими концентрированную полидисперсную суспензию.
2. Разработана оригинальная методика экспериментального определения скорости седиментации частиц полидисперсной суспензии.
3. Расчётно-теоретическое и экспериментальное исследования показали, что скорости седиментации частиц, составляющих полидисперсную суспензию, существенно отличаются от скоростей седиментации частиц такого же размера в монодисперсной суспензии.
4. Получены аналитические зависимости для расчета скорости седиментации частиц полидисперсной суспензии, которые достаточно корректно описывают наблюдаемый в практике эффект ускоренного осаждения мелкодисперсной фракции полидисперсной суспензии.
5. Проведена экспериментальная проверка предложенного метода расчета скорости седиментации частиц.
6. С помощью разработанной методики расчёта скоростей седиментации частиц, составляющих концентрированную полидисперсную суспензию, предложена уточнённая методика расчёта разделяющей способности аппаратов для разделения дисперсных систем, позволяющая решать задачи охраны геоэкологической среды путём очистки почво-грунтов и вод в гидроциклонах и отстойниках.

7. Проведена проверка методики расчета гидроциклона с использованием полученных формул с привлечением экспериментальных данных других авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Килимник Д.Ю., Дик И.Г., Неессе Т., Павлихин Г.П.. Экспериментальное исследование процесса седиментации полидисперсной суспензии: Труды 2-ой Международной научно-практической конференции «Экология речных бессаенов».- Владимир.: ВлГУ, 2002.- С.228-231.
2. Килимник Д.Ю., Павлихин Г.П., Duesck J. О седиментации полидисперсного материала: Труды 6-ой Московской международной телекоммуникационной конференции молодых ученых и студентов Молодежь и Наука.- М.: МИФИ, 2002. (<http://molod.mephi.ru/2002/>)
3. Дик И.Г., Килимник Д.Ю., Миньков Л.Л., Неессе Т. Измерение скорости седиментации мелкодисперсных частиц в тарельчатой центрифуге//Инженерно-физический журнал.- 2003.- Том. 76, №. 4.- С.7-17.
4. Килимник Д.Ю., Дик И.Г., Пурэвжав Д., Павлихин Г.П. Влияние адгезионных сил на пористость порошковых материалов: Тез. докл. Международной коференции Space-2003.- Москва-Калуга, 2003.- С.116-117.
5. Дик И.Г., Пурэвжав Д., Килимник Д.Ю. К теории пористости мелкозернистых седиментов//Инженерно-физический журнал.- 2004.- Том. 77, №. 1.- С.77-85.
6. Kilimnik D., Dück J., Neesse T. Experimentelle Untersuchungen zur behinderten Sedimentation polydisperser Systeme: Тез. докл. Sitzung der GVC-

Fachausschüsse der VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen.- Baden-Baden, 2004.- С. М11.

7. Duech J., Minkov L., Kilimnik D., Neesse Th. Theoretical and experimental investigation for the settling of a polydisperse suspension. Тез. докл. Fifth International Conference on Multiphase Flow.- Yokohama (Japan), 2004.- С.1-12.
8. Килимник Д.Ю., Дик И.Г., Неессе Т. Павлихин Г.П. Уточнённая методика расчёта разделяющей способности гидроциклонных аппаратов: Труды Пятого международного молодёжного экологического форума стран Балтийского региона «Экобалтика-2004».- С.-Пб.: СПбГПУ, 2004.- С. 45-48.