

На правах рукописи



ГРЕЧУШКИН АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ВЕРОЯТНОСТНО - СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ИЗМЕНЕНИЯ
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ
ЗАГРЯЗНЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ ЖИДКОСТЕЙ**

Специальность: 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность.

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Павлихин Г.П.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Иванов Б.А.
- кандидат технических наук Новиков Ю.М.

Ведущая организация: ОАО "Криогенмаш"

Защита диссертации состоится «15» июня 2005 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 263-68-40

Автореферат разослан «__» _____ 2005 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета,
кандидат технических наук, доцент

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1715917

Гречушкин А. Н. Вероятност

 Глухов С.Д.

Актуальность темы. Безопасность эксплуатации жидкостных систем различного назначения является одной из составляющих обеспечения безопасности многих процессов. Некоторые жидкостные системы, в частности криогенные, являются потенциально опасными.

Возникновение многих опасных и вредных факторов может быть вызвано разрушением элементов таких жидкостных систем вследствие повышения давления рабочей среды, механического воздействия и т.п. Учитывая, что объем резервуаров для хранения криопродуктов достигает тысяч кубических метров, авария на них может приводить к катастрофическим последствиям. Одной из причин аварий может послужить накопление некоторых дисперсных загрязнений в элементах оборудования. Например, дисперсные осадки кислорода в жидком водороде и осадки углеводородов в жидком кислороде толщиной в десятки мкм способны приводить к взрыву.

Для полидисперсных малоконцентрированных суспензий, которыми являются большинство рабочих сред жидкостных систем, накопление дисперсных загрязнений в элементах систем обуславливается не только количественной характеристикой загрязнений, но и их гранулометрическим составом. Для предотвращения накопления загрязнений и достижения необходимой степени чистоты жидкостей используют различные методы и системы очистки. Если концентрацию загрязнений на выходе систем очистки можно достаточно достоверно оценить известными методами, то гранулометрический состав, как правило, считают неизменным в начале и конце различных процессов, а возможными изменениями во времени пренебрегают. Подобный подход можно считать оправданным только при наличии количественных сведений о возможных изменениях гранулометрического состава загрязнений в технологических процессах.

Процесс фильтрования является неотъемлемой частью большинства систем очистки жидкостей. Гидравлические и технологические свойства фильтровальных перегородок, используемых для этих целей, исследованы к настоящему времени достаточно полно, однако их фильтровальные характеристики изучены недостаточно. Для расчета фильтровальных характеристик перегородок используют несколько подходов, в частности, феноменологический подход; подход, основанный на описании поведения отдельных частиц; и подход, основанный на методах статистической физики. Из существующих на настоящий момент методов расчета фильтровальных характеристик перегородок наиболее перспективными, по всей видимости, являются методы, основанные на вероятностно – статистическом подходе. При использовании этих методов, по сравнению с другими, как правило, требуется значительно меньшее число экспериментальных данных. Ограничивает применение этих методов отсутствие достаточно простых к применению инженерных методик расчета на их основе и то, что одной из основных характеристик, необходи-

мых для их применения, является гранулометрический состав дисперсной фазы как перед фильтровальной перегородкой, так и после нее.

Таким образом, количественная информация о гранулометрическом составе загрязнений является необходимой как для расчета фильтровального процесса, так и для безопасной эксплуатации жидкостных систем.

Для большинства технологических процессов систем очистки необходимые сведения в принципе могут быть получены путем применения соответствующих моделей, однако достаточно простого и универсального метода расчета изменения гранулометрического состава загрязнений в настоящее время не существует и в подавляющем большинстве случаев специалисты вынуждены базироваться на опыте предшествующих разработок. Использование предшествующего опыта совместно с предложенным методом позволит, по всей видимости, снизить экономические издержки при разработке систем очистки, а также избежать возможных серьезных ошибок.

Исходя из этого, разработку метода расчета изменения гранулометрического состава загрязнений в технологических процессах систем очистки, базирующегося на вероятностно – статистическом подходе, можно считать актуальной и практически значимой. Однако в настоящее время подобные методы находятся лишь на начальном этапе своей практической реализации.

Создание такого метода расчета дает возможность при проектировании систем очистки жидкостей от дисперсных загрязнений сократить число величин, определяемых экспериментально, а в некоторых случаях обойтись только данными из справочной литературы, и кроме того, позволит одновременно расширить область представления о происходящих процессах.

Целью диссертации является создание вероятностно - статистического метода расчета изменения гранулометрического состава дисперсной фазы суспензий в системах очистки жидкостей.

Методы исследования. В диссертации использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследования. Теоретические методы базировались на вероятностно – статистическом подходе в рамках теории Марковских процессов.

Научная новизна:

1. Показана возможность применения вероятностно-статистического метода для расчета изменения гранулометрического состава загрязнений в системах очистки жидкостей.
2. Выяснено, что необходимым параметром для объективного расчета систем очистки являются количественные характеристики изменения гранулометрического состава загрязнений в технологических процессах.
3. Показана и подтверждена возможность представления изменения гранулометрического состава дисперсной фазы суспензий как случайного марковского процесса.

4. Установлено, что изменение гранулометрического состава может быть удовлетворительно описано диффузионным уравнением в частных производных параболического типа.
5. Разработана дискретная модель непрерывного процесса изменения гранулометрического состава дисперсной фазы суспензий в технологических процессах очистки жидкостей. Определена взаимосвязь между параметрами дискретного и непрерывного процессов в рамках принятой модели. Показано, что приращения величины седиментационной скорости или размера частиц, начиная с третьего члена, имеют нулевой порядок малости.
6. Показана возможность применения асимптотических методов для исследования предложенной модели. Выявлено, что гранулометрический состав загрязнений при $t \rightarrow \infty$ может быть рассмотрен как некоторое вероятностное состояние системы, соответствующее установившемуся движению, которое достигается после затухания всех переходных процессов, связанных с влиянием начальных условий.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1. Разработан вероятностно-статистический метод расчета изменения гранулометрического состава загрязнений в технологических процессах систем очистки жидкостей.
2. Установлено, что в условиях седиментационного разделения дисперсных систем все компоненты дисперсной фазы могут анализироваться независимо друг от друга.
3. Экспериментально показано, что стационарные функции распределения частиц по размерам в условиях седиментационного разделения дисперсных систем могут быть удовлетворительно описаны экспоненциальным распределением или распределением Вейбула – Гнеденко.
4. В рамках вероятностно-статистического подхода создана модель отбора суспензии из накопительно-раздаточного резервуара, которая позволяет прогнозировать гранулометрический состав в отборном трубопроводе в зависимости от параметров системы.
5. Создана модель осаждения при движении в прямолинейном канале при ламинарном и слаботурбулентном режимах течения для случаев невыпадения осадка и выпадения частиц в осадок.
6. Разработана модель фильтровального процесса в фильтре тонкой очистки. Показано, что для расчета необходимо знание трех величин, значение которых можно установить экспериментально.

Апробация работы и публикации. По материалам диссертации опубликовано 3 научные работы.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Диссертационная работа изложена на 149 машинописных листах, содержит 21 рисунок и 11 таблиц. Список литературы содержит 54 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена область исследования и сформулирована цель работы. Рассмотрены методы исследований, раскрываются новизна и практическая ценность работы. Представлена структура работы.

В первой главе проведен анализ дисперсных загрязнений криогенных жидкостей. Выяснено, дисперсные загрязнения криогенных жидкостей являются полидисперсными с максимальным размером частиц, в основном, до 50 мкм. Представлены типичные гистограммы дисперсной фазы в накопительно – раздаточных резервуарах криогенных систем. Показано, что процесс накопление осадков в криогенных системах, в частности, зависит от их гранулометрического состава дисперсных загрязнений.

В первой главе также проведен обзор применяемых в настоящее время методов расчета фильтровального процесса и сделан вывод о перспективности развития вероятностно - статистических методов расчета фильтров. Рассмотрение существующих в настоящее время вероятностно – статистических методов расчета показало, что необходимой информацией при расчетах фильтров является гранулометрический состав загрязнений как перед фильтровальной перегородкой, так и после нее. Сделано заключение, что при расчете фильтров данным методом необходимо рассматривать техническую систему очистки в целом, учитывая изменения гранулометрического состава дисперсной фазы в технологических процессах, предшествующих процессу фильтрования. Проведенный анализ методов расчета изменения гранулометрического состава показал, что используемые в настоящее время методы разрознены, носят частный характер и достаточно универсального на настоящий момент не существует.

При обзоре методов расчета изменения гранулометрического состава загрязнений в технологических процессах систем очистки жидкостей было выявлено три основных подхода:

- феноменологический подход;
- подход, основанный на использовании методов молекулярной динамики;
- подход, основанный на использовании методов статистической физики.

Сделан вывод о том, что наиболее перспективным следует признать подход, основанный на использовании методов статистической физики.

Были выявлены технологические процессы, которые являются неотъемлемой частью систем очистки жидкостей и которые вносят вклад в изменение гранулометрического состава загрязнений. Установлено, что основной вклад в изменение гранулометрического состава вносит процесс седиментации.

Был сделан вывод о целесообразности создания достаточно универсального метода расчета изменения гранулометрического состава загрязнений в рамках вероятностно – статистического подхода.

На основе проведенного обзора определены цели и поставлены следующие задачи исследования:

- анализ процессов изменения гранулометрического состава суспензий в технологических процессах очистки жидкостей;
- создание математической модели изменения гранулометрического состава на базе вероятностно-статистических методов расчета;
- проверка практического применения модели на основе экспериментальных данных;
- разработка инженерной методики расчета фильтров на базе созданной математической модели.

Во второй главе диссертации представлена математическая модель изменения гранулометрического состава дисперсной фазы суспензий.

Для расчета процесса фильтрования вероятностно – статистическим методом необходимо знание полного числа частиц в системе $N(t)$ и гранулометрический состав дисперсной фазы. Полное число частиц в системе достоверно можно определить по эмпирическим зависимостям. Изменение же гранулометрического состава представлено функцией, зависящей от пространственных переменных $\{x\}$, характерного размера частиц $\{y\}$ и времени t :

$$f(\{x\}, \{y\}, t) d\{x\} d\{y\} = f_n(\{x\}, \{y\}, t) d\{x\} d\{y\} / N(t), \quad (1)$$

где функция характеризует вероятность попадания частицы некоторой фракции в определенный момент времени в достаточно малый объем с некоторыми координатами и постоянным содержанием дисперсной фазы.

Задача определения искомой функции (1) сведена к парному отысканию двух функций: например, плотности распределения всех частиц по размерам и условной плотности распределения концентрации частиц. Для простоты функции анализировались не более чем в двухмерном пространстве случайных величин x и y .

Описание процессов изменения гранулометрического состава дисперсной фазы суспензий в некоторой системе, в пространстве и времени, в частности, возможно на основании кинетических уравнений. Из феноменологических предпосылок было получено уравнение кинетики процесса в виде:

$$\frac{\partial f_{\Sigma}(y, t)}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial [D(y) \cdot f_{\Sigma}(y, t) d\Delta U(y) / dy]}{\partial y} + \frac{\partial [D(y) \cdot \partial f_{\Sigma}(y, t) / \partial y]}{\partial y}, \quad (2)$$

где $D(y)$ – коэффициент диффузии на прямой параметра y .

$\Delta U(y)$ – энергия системы;

k – некоторый коэффициент.

Кинетическое уравнение (2) были выведены при допущении, что частицы не оказывают друг на друга взаимного влияния, т.е. результат справедлив только для малоконцентрированных суспензий.

Уравнение (2) при условии, что выражение $k \cdot D(y) \cdot d\Delta U(y) / dy$ является средней скоростью систематического изменения величины y , совпадает с

уравнением типа Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК). Это позволяет рассматривать процесс изменения гранулометрического состава всей совокупности частиц как некоторый случайный марковский процесс их рождения и гибели или вхождения в рассматриваемую систему и выхода из нее.

При допущении постоянства доли частиц любого размера получено стационарное распределение:

$$f_{\Sigma}(y) = k \cdot \exp(-k\Delta U(y)) \quad (3)$$

Стационарная функция (3) определяется энергией системы и никаких ограничений на вид функции кроме условия нормировки и среднего значения энергии системы не существует. Другими словами, получено каноническое распределение закрытой макросистемы, показывающее, что никаких ограничений на вид функции $f_{\Sigma}(y)$, кроме условия нормировки и фиксированности среднего значения энергии системы не существует. При этом элементы системы будут находиться в наиболее вероятном состоянии, соответствующем распределению (3).

Исходно уравнение (2) было выведено из феноменологических соображений, однако оно может быть получено и исходя из стохастической природы процессов. Стохастическая природа происходящих процессов проявляется в наличии флуктуаций скорости изменения какого-либо параметра системы. При этом флуктуации происходят около среднего значения, что в свою очередь приводит к флуктуациям функции плотности распределения. Исходя из этих представлений было получено уравнение для функции условной плотности распределения концентрации частиц, которое после элементарных преобразований приводится к виду уравнения (2).

Изменение гранулометрического состава загрязнений в процессах и аппаратах очистки жидкостей происходит, как правило, в результате седиментации в поле сил земного притяжения. В первую очередь это технологические процессы хранения и транспортировки.

Исходя из этого были рассмотрены стационарные процессы. Физически это означает, что состояние системы соответствует установившемуся движению, которое достигается после затухания всех переходных процессов, связанных с влиянием начальных условий.

Рассмотрена емкость постоянного сечения, в которой происходит седиментация частиц дисперсной фазы. Считается, что движение всех рассматриваемых частиц подчиняется закону Стокса. В рамках предложенной вероятностно – статистической модели получен гранулометрический состав загрязнений в емкости по истечению достаточно большого промежутка времени.

В идеальном случае, если емкость находится при постоянной температуре в условиях полного термостатирования (адиабатная система), то энергия рассматриваемой системы определяется относительной массой частиц m

(скорости седиментации v_c) и зависит от высоты h . Т.е. координата x в уравнении (1) соответствует h , а координата y - m (v_c).

Наличие конвективного перемешивания в емкости, например из-за теплопритоков, учитывались путем переопределения координат: в принятых ранее обозначениях, координата x соответствует h , а координата y соответствует скорости витания v .

В результате рассмотрения стационарных распределений установлено, что распределения частиц по массе, скорости седиментации, следуя уравнению (3), будут экспоненциальными и определяться средней массой частиц либо средней скоростью витания. Распределения частиц по размеру описываются в рамках распределения Вебула-Гнеденко. Условные распределения частиц дисперсной фазы по высоте емкости являются распределениями Эрланга 2-го порядка.

Полученные зависимости позволяют по средней массе или характерному размеру витающих частиц найти вид распределения частиц по размерам. При этом средние значения массы или размера частиц можно рассчитать по эмпирическим зависимостям либо определить экспериментально.

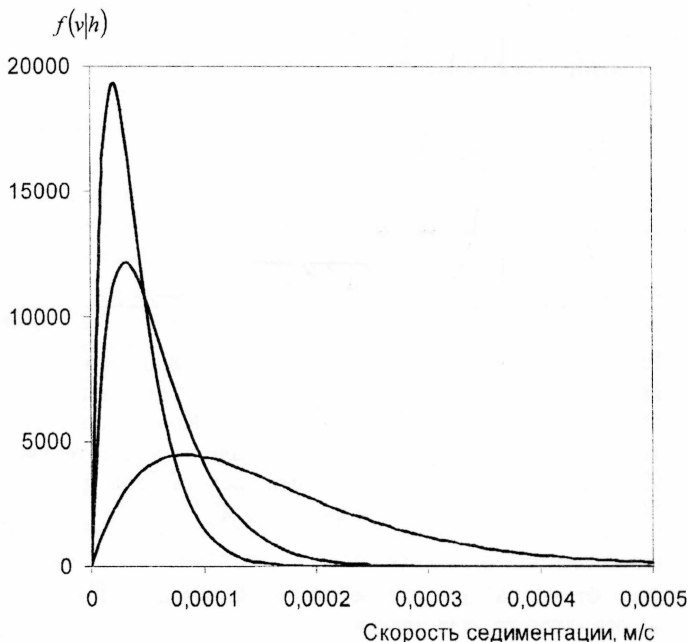


Рис. 1. Стационарные распределения частиц дисперсной фазы по скорости седиментации на различной высоте от нижней части резервуара

Полученные стационарные распределения, рис. 1, в частности, свидетельствуют о том, что в рассматриваемых условиях проба, отобранная в емкости на некоторой высоте, не может непосредственно охарактеризовать гранулометрический состав загрязнений для всей емкости в целом. И наоборот, осредненная проба из емкости не может непосредственно охарактеризовать гранулометрический состав загрязнений, находящихся в ней на некоторой высоте.

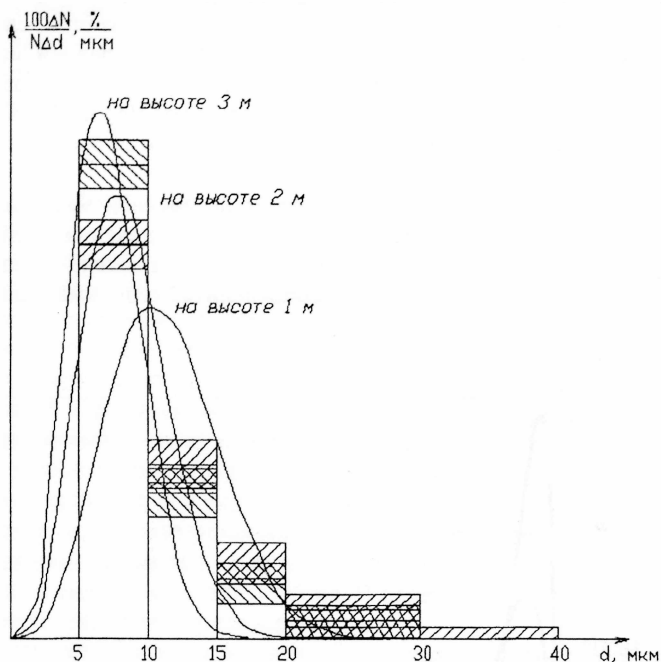


Рис. 2. Распределения механических загрязнений жидкого технического кислорода по размерам на различной высоте от нижней части накопительно – раздаточного резервуара. Кривые соответствуют теоретическим распределениям на различной высоте; гистограммы с доверительными интервалами представлены для высоты 1 м и высоты 3 м

Поскольку стационарные распределения справедливы для неограниченной по высоте емкости, для реальных технических систем, как правило, следует учитывать высоту столба жидкости и влияние зеркала жидкости. Для ограниченного по высоте столба жидкости были получены решения уравнения типа ФПК с граничными условиями третьего рода и смешанными гра-

ничными условиями. Полученные аналитические решения позволяют оценить распределение дисперсной фазы по высоте емкости для случая невыпадения частиц дисперсной фазы в осадок и для случая выпадения осадка.

Поскольку уравнения типа ФПК не во всех практически значимых случаях имеют аналитическое решение, для случаев численного решения уравнений данного типа была рассмотрена дискретная модель непрерывного процесса изменения гранулометрического состава загрязнений. Анализ дискретной модели непрерывного процесса изменения гранулометрического состава дисперсной фазы проведен на примере установления связи между условными вероятностями и параметрами при рассмотрении предельного перехода от цепи Маркова к непрерывному процессу. Показано, что приращения изменяющейся величины седиментационной скорости или размера частиц, начиная с третьего члена, имеют нулевой порядок малости. Предложенная дискретная модель расширяет возможности практического применения предложенной математической модели.

Показано, что изменение гранулометрического состава загрязнений на выходе из емкости зависит не только от распределений дисперсной фазы в зоне отбора, но также от расходных характеристик и конструктивных особенностей отборника. Для определения возможных изменений был рассмотрен ограниченный во времени процесс отбора дисперсной фазы при наличии конвективного движения дисперсионной среды в зоне отбора. Полученное решение позволило определить число частиц некоторой фракции, попавшей в отборник за определенный промежуток времени.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальной проверке предложенной вероятностно – статистической модели изменения гранулометрического состава загрязнений.

Проверка модели осуществлена путем сравнения теоретических стационарных распределений дисперсной фазы с экспериментальными распределениями из накопительно – раздаточного резервуара ВРУ Балашихинского кислородного завода. Накопительно – раздаточный резервуар представляет собой горизонтальный цилиндрический сосуд объемом 75 м^3 и диаметром 4 м.

Экспериментальные гистограммы, характеризующие распределение загрязнений во всем резервуаре и гистограммы загрязнений в отборном трубопроводе из средней части резервуара дали возможность получить численные значения необходимых параметров. Это позволило построить гистограммы загрязнений в любом сечении резервуара и провести их сравнение с теоретическими стационарными распределениями, полученными во второй главе диссертации. Теоретические и экспериментальные распределения с доверительными интервалами представлены на рис. 2.

Таким образом, проверка показала справедливость полученных стационарных распределений, а соответственно и предложенной вероятностно –

статистической модели применительно к процессам хранения криопродуктов, где определяющим является процесс седиментации.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию возможности применения модели изменения гранулометрического состава загрязнений к конкретным технологическим процессам.

Показано, что предложенный вероятностно – статистический метод расчета изменения гранулометрического состава дисперсной фазы суспензий применим для расчета различных процессов в системах очистки жидкостей. В диссертационной работе рассмотрено два практических приложения предложенного метода: модель изменения гранулометрического состава загрязнений в соединительных каналах и модель изменения гранулометрического состава в фильтрах тонкой очистки. В четвертой главе представлена модель изменения гранулометрического состава в прямолинейных каналах.

Соединительные каналы являются неотъемлемой частью любой системы очистки жидкостей. Гранулометрический состав загрязнений в каналах может существенно изменяться в результате оседания частиц дисперсной фазы на стенки. На основе предложенной модели представлена модель изменения гранулометрического состава в прямолинейных каналах, которая позволяет определить функцию плотности распределения частиц дисперсной фазы по размерам на выходе некоторого участка канала при различных режимах течения. Модель также позволяет определить количество загрязнений, унесенного потоком несущей среды и распределение загрязнения по сечению трубы.

При создании математической модели был рассмотрен прямолинейный участок нетермостатированного трубопровода постоянного сечения. Движение частицы дисперсной фазы в реальном потоке жидкости может быть описано уравнением Чена. Были проанализированы его компоненты применительно режимам течений наиболее распространенным в системах очистки жидкостей и установлено, что на частицу действуют: сила тяжести, сила Архимеда, сила сопротивления Стокса. Входящими в уравнение движения сферической частицы в реальном потоке в рассматриваемом случае можно пренебречь. Ввиду крайне малой инерционности частиц дисперсной фазы, нестационарностью движения для частиц с размером до 50 мкм также пренебрегалось.

Следуя выводам и результатом второй главы диссертации, изменение гранулометрического состава дисперсной фазы было описано следующим уравнением диффузионного типа:

$$\frac{n_0(h|r,t)}{\partial t} = v_c \frac{\partial n_0(h|r,t)}{\partial h} + \frac{D \partial^2 n_0(h|r,t)}{\partial h^2}, \quad (4)$$

Уравнение (4) решено при предположении, что на входе в рассматриваемый участок трубопровода частицы дисперсной фазы равномерно распределены по сечению трубы.

В случае если стенки трубопровода являются непоглощающими, т.е. выпадение частиц дисперсной фазы в осадок не происходит, граничные условия к уравнению являются граничными условиями третьего рода.

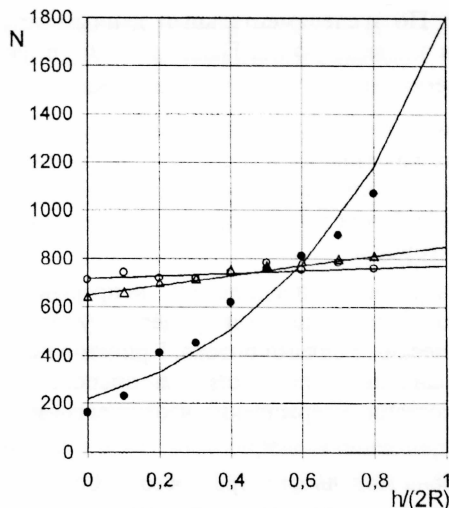


Рис. 3. Экспериментальные точки и теоретические кривые распределения частиц электрокорунда по сечению горизонтального трубопровода $\varnothing$ 40 мм (дисперсионная среда - дистиллированная вода) в зависимости от размера:

○ - 5 – 15 мкм; △ - 25 – 40 мкм; ● - 50 – 100 мкм

Для случая выпадения загрязнения в осадок граничное условие в верхней части будет граничным условием третьего рода, а граничные условия на нижней поверхности трубы будут иметь иной вид: если оседают все достигшие дна трубопровода частицы, т.е. стенки являются абсолютно поглощающими, граничное условие на нижней части трубопровода будет граничным условием второго рода.

В рамках модели определен не только гранулометрический состав на выходе некоторого участка прямолинейного канала, но и определена доля частиц дисперсной фазы, осевшей на дно канала за определенный промежуток времени, а также определена доля частиц, унесенных потоком. Соответствующие выражения представлены в четвертой главе диссертации.

Для проверки предложенной модели изменения гранулометрического состава дисперсной фазы в соединительных каналах рассмотрены экспериментальные данные по распределению частиц электрокорунда в трубопроводах с непоглощающими стенками при различных режимах течений (рис. 3). Проверка показала соответствие теоретических и экспериментальных рас-

пределений для мелких фракций и расхождения, превышающие экспериментальную погрешность, для фракции 50-100 мкм. Сравнение теоретических и экспериментальных распределений позволило также выявить границы применимости предложенной модели и определить численные значения коэффициента диффузии. По экспериментальным данным установлено, что модель применима при значении числа Пекле $Pe > 0,03$ в ламинарном режиме течения и $Pe \geq 0,1$ в переходном и турбулентном режимах.

В пятой главе диссертации представлена модель изменения гранулометрического состава загрязнений в фильтрах тонкой очистки, позволяющая оценить гранулометрический состав дисперсной фазы на выходе из фильтра в зависимости от его рабочих размеров, а также свойств дисперсной фазы и фильтровальной перегородки.

Процесс фильтрования представлен непрерывным динамическим процессом задержания частиц в порах и процессом уноса задержанных ранее частиц гидродинамическими силами потока. Причем влияние последних увеличивается по мере заполнения пор частицами дисперсной фазы. При равенстве сил адгезии и когезии, удерживание частиц загрязнений слоем перегородки прекращается.

Была рассмотрена модель фильтра постоянного сечения и свойствами фильтровальной перегородки примерно одинаковыми по толщине. Принималось, что суспензия подается с постоянным расходом и некоторым постоянным гранулометрическим составом на входе. После прохождения фильтра осветленная суспензия удаляется.

Установлено, что при движении частицы дисперсной фазы в фильтровальной перегородке определяющим является седиментационный размер частицы v .

Опираясь на предположение, что интенсивность случайных сил неизменна по всей толщине фильтровальной перегородки и используя представленный во второй главе диссертации вероятностно – статистический метод расчета изменения гранулометрического состава загрязнений, записано следующее выражение:

$$\frac{\partial f(r, t|h)}{\partial t} = k_h \frac{\partial (f(r, t|h)(r^2 - r_0^2)/r)}{\partial r} + \frac{D_h \partial^2 (f(r, t|h))}{\partial r^2}, \quad (5)$$

где k_h - некоторый коэффициент;

$D_h = const$ - коэффициент диффузии по координате h ;

r - радиус частиц дисперсной фазы.

При решении уравнения (5) в качестве начального условия использовалась функция плотности распределения частиц дисперсной фазы на входе в фильтр. Также при решении использовалось условие нормировки, которой должна удовлетворять функция плотности распределения.

Общее решение этого уравнения (5) представлено в диссертации. Анализ решения уравнения показал, что если среднее время пребывания дисперсионной среды (как наименее инерционной составляющей системы) в фильтре оказывается не менее величины $t_{np} = 3/k_h$, то функция распределения на выходе из фильтра становится практически стационарной и вместо общего решения можно использовать следующее выражение:

$$f_{\infty}(r|h) = \frac{2}{\Gamma\left(\frac{\Theta+1}{2}\right)} \left(\frac{\Theta}{2r_0^2}\right)^{\frac{\Theta+1}{2}} r^{\Theta} \exp\left(-\frac{k_h r^2}{2D_h}\right), \quad (6)$$

Из уравнения (6) были получены необходимые ограничения на величину объема фильтра и минимальную толщину фильтровальной перегородки, при которых распределение на выходе становится практически стационарным.

Выражение (6) показывает, что при толщине фильтровальной перегородки, превышающей некоторое минимальное значение, стационарное распределение не зависит от начального распределения и определяется некоторой комбинацией величин k_h , D_h и r_0^2 .

При использовании в качестве определяющей переменной – седиментационной скорости частиц, выражение (6) принимает следующий вид:

$$f_{\infty}(v|h) = \frac{1}{\Gamma\left(\frac{\Theta+1}{2}\right)} \left(\frac{\Theta}{2v_0}\right)^{\frac{\Theta+1}{2}} v^{\frac{\Theta-1}{2}} \exp\left(-\frac{\Theta v}{2v_0}\right), \quad (7)$$

где $\Theta = k_h v_0 / a_1 D_h$.

Формула (7) применима при $\Theta \geq 1$. Установлено, что при $\Theta = 3$ параметр Θ и отношение k_h/D_h являются функциями толщины перегородки h , причем с увеличением h величины k_h/D_h и Θ также увеличивается. В тоже время при $\Theta \gg 1$ функция $f_{\infty}(v|h)$ стремится к δ – образным предельным распределениям, в которых $f_{\infty}(v|h)$ зависит только от одной величины r_0^2 . При этом дальнейшее увеличение толщины фильтровальной перегородки будет приводить лишь к незначительному изменению дисперсности системы на выходе из нее. В результате из обратной зависимости $h = h(\Theta)$ для $\Theta_{np} \geq 9$ находится $H_{\phi} = h(\Theta_{np})$.

Зависимость функции $f_{\infty}(v|h)$ от величины v при различных значениях параметра Θ отражена на рис. 4.

Таким образом, при достаточной толщине фильтровальной перегородки, зная три характеристики дисперсной фазы и перегородки: k_h , D_h и r_0^2 , определяемые экспериментально или из справочных данных, можно определить гранулометрический состав загрязнения на выходе фильтра. Кроме того, можно считать, что при $\Theta_{np} \geq 9$ гранулометрический состав на выходе является моодисперсным. Следовательно, в этом случае последующие за фильт-

рованием технологические процессы следует рассчитывать по методикам, применимым к монодисперсным системам.

Для проверки математической модели изменения гранулометрического состава дисперсной фазы суспензий в фильтре тонкой очистки были создан стенд и была проведена серия опытов по фильтрованию суспензий с определением гранулометрического состава загрязнений на входе в фильтр и на выходе и анализом полученных распределений. Процесс фильтрования осуществлялся при постоянном перепаде давления.

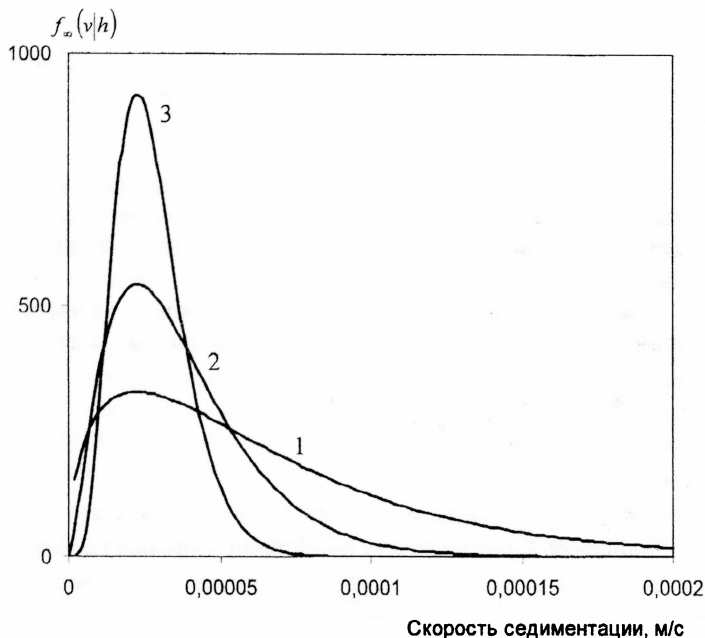


Рис. 4. Зависимость предельного распределения $f_\infty(v/h)$ от параметра Θ :
1 - $\Theta=1$; 2 - $\Theta=3$; 3 - $\Theta=9$, $v_0 = 2.25 \cdot 10^{-5}$ м/с

Фильтровальная перегородка на экспериментальном стенде моделировалась пакетом металлических сеток с размером ячейки 40 и 71 мкм. Дисперсной фазой являлись сферические частицы стиракрила. Определение числа и размера частиц на входе в фильтр и его выходе определялось микроскопическим методом.

Результаты экспериментальных исследований показали хорошее соответствие теоретических и экспериментальных распределений, что позволило сделать вывод о состоятельности предложенной математической модели и

получить для исследуемых фильтровальных образцов и суспензий численное значение параметров.

Предложенная теоретическая модель и результаты экспериментальных исследований позволили создать инженерную методику расчета фильтров тонкой очистки

Инженерная методика расчета фильтров позволяет определить время защитного действия фильтра для обеспечения номинальной тонкости очистки. Расчет проводится по следующим этапам:

1. Из анализа технологических процессов, предшествующих фильтрованию, определяется функция распределения дисперсной фазы перед фильтровальной перегородкой. В случае $\frac{\sigma}{2r_0} \leq 0,15$, где σ - среднеквадратическое отклонение, система считается моодисперсной и расчет процесса фильтрования осуществляется по любой стандартной методике расчета фильтров, пригодной для моодисперсных систем. В случае полидисперсной системы на входе, по экспериментальным либо справочным данным определяются величины k_a , Θ и r_0^2 , характеризующие распределение на выходе фильтровальной перегородки.
2. Из технического задания назначается номинальная тонкость очистки. Исходя из гранулометрического состава и массовой концентрации загрязнения на входе в фильтр определяется число частиц с размером, превышающим номинальную тонкость очистки. По номинальной тонкости очистки определяется допустимое число частиц того же размера на выходе фильтра.
3. По распределению дисперсной фазы на выходе фильтровальной перегородки рассчитывается доля частиц с размером больше величины номинальной тонкости очистки. По числу частиц дисперсной фазы с размером больше номинального и гранулометрическому составу на выходе фильтра определяется допустимая счетная концентрация всей дисперсной фазы.
4. По любой методике, пригодной для моодисперсной среды, рассчитывается изменение массовой концентрации всей дисперсной фазы по толщине фильтровальной перегородки и производится пересчет массовой концентрации в счетную. Определяется толщина перегородки, необходимая для достижения необходимой счетной концентрации всей дисперсной фазы, а следовательно, и номинальной тонкости очистки фильтра.

В приложениях к диссертации приведен анализ погрешностей экспериментальных данных, а также алгоритм программы по расчету числа частиц дисперсной фазы суспензии в отборном трубопроводе при наличии конвективного движения дисперсионной среды в зоне отбора.

Основные результаты работы

1. Теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность применения вероятностно-статистического метода расчета изменения гранулометрического состава загрязнений в технологических циклах на основе случайных марковских процессов.
2. Показано, что изменение гранулометрического состава загрязнений удовлетворительно может быть описано уравнением диффузионного типа, уравнению типа Фоккера – Планка – Колмогорова.
3. На основе вероятностно-статистического метода расчета создана математическая модель изменения гранулометрического состава дисперсной фазы суспензий в технологических циклах различного типа, включая процессы фильтрования и седиментации, и изучены ее асимптотические свойства.
4. Разработана дискретная модель непрерывного процесса изменения гранулометрического состава дисперсной фазы суспензий, которая расширяет возможности практического приложения математической модели.
5. Показано, что информация об изменении гранулометрического состава загрязнений в технологических процессах в системах очистки, предшествующих фильтрованию, является необходимой при расчете фильтров.
6. Разработана методика расчета изменения гранулометрического состава загрязнений в фильтрах тонкой очистки, позволяющая использовать не только осредненные характеристики, но и весь спектр размеров частиц, и проведена ее экспериментальная проверка.
7. На базе предложенной математической модели разработана инженерная методика расчета фильтров тонкой очистки.

Публикации по теме диссертации:

1. Павлихин Г.П., Львов В.А., Гречушкин А.Н. Вероятностный метод расчета изменения гранулометрического состава дисперсных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2003. – №2. – С. 3-14.
2. Павлихин Г.П., Львов В.А., Гречушкин А.Н. Расчет ресурсных характеристик фильтров с учетом послойного разбиения фильтровальной перегородки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2001. – № 2. – С. 114-117.
3. Павлихин Г.П., Львов В.А., Гречушкин А.Н. Статистическое исследование процесса фильтрования малоконцентрированной суспензии зернистой загрузкой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки. – 2002. – № 2. – С. 121-125.

Подписано к печати 25.04 2005. Объем 1,0 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ 127 Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана