

Крохина Алина Вадимовна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРОКОНИЧЕСКИХ
ГИДРОЦИКЛОНОВ-КЛАССИФИКАТОРОВ
МАЛЫХ РАЗМЕРОВ С ИНЖЕКЦИЕЙ**

05.04.13 - Гидравлические машины, гидропневмоагрегаты

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Научный руководитель: **Павлихин Геннадий Петрович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Баранов Дмитрий Анатольевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
машиностроительный университет «МАМИ»,
заведующий кафедрой процессов и аппаратов
химической технологии

Волшаник Валерий Валентинович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО НИУ «Московский государственный
строительный университет»,
профессор кафедры гидравлики и водных ресурсов

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Национальный
исследовательский технологический университет
«МИСиС»

Защита диссертации состоится 20 мая 2015г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» и на сайте университета <http://bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим присылать по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «___» _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Колосов М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Аппараты циклонного типа являются составной частью многих гидравлических машин, устройств, аппаратов и гидропневмоагрегатов, используемых при решении большого числа производственных, технических и технологических задач, включая задачи экологии, надежности и безопасности.

Современные технические потребности заставили широкий круг исследователей обратиться к проблеме классификации высокодисперсных фракций суспензий с размером частиц менее 5 мкм, при решении которой особое место занимают цилиндроконические гидроциклоны-классификаторы малых размеров, характеризующиеся как малым диаметром цилиндрической части $d \leq 50$ мм, так и малым углом конусности $\theta \leq 6^\circ$.

Исследования разделяющей способности этих аппаратов выявили ряд особенностей и явлений, одним из которых является «fish-hook» эффект, заключающийся в поступлении тонкодисперсных частиц твердой фазы в крупнодисперсный продукт классификации. Помимо уменьшения производительности технологического оборудования, данный эффект ухудшает качество целевого продукта и снижает эффективность работы последующих ступеней очистки, что нередко приводит к загрязнению биосферы.

Для устранения указанных проблем широкое применение нашли цилиндроконические гидроциклоны-классификаторы малых размеров с инжекцией, внедрение которых сдерживается рядом нерешенных вопросов.

К ним, в первую очередь, следует отнести отсутствие однозначных экспериментальных данных о характеристиках цилиндроконических гидроциклонов малых размеров, которые определяются параметрами процесса классификации и изменением структуры потоков в аппарате в зависимости от конструктивного оформления гидроциклона и инжектора.

Кроме того, имеют место различия в подходах к теоретическому описанию протекающих процессов в аппаратах подобного типа, где интенсивность случайных составляющих основных процессов имеет определяющее значение.

Более того, для решения современных практических задач требуется нахождение явного вида непрерывной функции эффективности разделения частиц $T=T(d_u)$ во всем диапазоне размеров частиц.

Указанные обстоятельства связаны как с незавершенностью разработки общей теории процессов переноса в гидроциклонах-классификаторах, так и с отсутствием универсальных методик расчета, выбора и конструктивного оформления аппаратов.

Таким образом, определение характеристик цилиндроконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инжекцией можно отнести к актуальным и практически значимым задачам современных гидравлических машин, устройств, аппаратов и гидропневмоагрегатов.

Целью настоящей работы является определение характеристик цилиндроконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инжекцией и разработка методики их расчета на основании комплексного подхода, базирующегося на вероятностно-статистических методах описания процесса эволюции водных полидисперсных систем «жидкость – твердое тело».

Методы исследования. В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования проведены на кафедре экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Н.Э. Баумана. Экспериментальные исследования проведены в лабораторных условиях на базе технического факультета Университета Эрланген-Нюрнберг, Германия. Модельные исследования проведены на основе вычислительного эксперимента с использованием пакета прикладных программ. Обработка экспериментальных данных проводилась прямым и косвенным способами анализа с применением методов математической статистики, корреляционного и регрессионного анализа.

Научная новизна:

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что поведение частиц дисперсной фазы суспензии в процессе классификации в цилиндроконических гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инъекцией может быть описано на основе стационарных решений кинетического уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова в пространстве новой обобщенной координаты. Аналитически найден явный вид непрерывной функции эффективности разделения частиц в аппарате в исследуемом диапазоне размеров частиц с учетом проявления «fish-hook» эффекта.
2. Теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность описания характеристик классификации суспензии в гидроциклоне с инъекцией с помощью семейства трехпараметрических кривых, формально совпадающих с универсальными эмпирическими формулами Свенсона – Авдеева.
3. Установлено, что разделяющая способность цилиндроконических гидроциклонов-классификаторов с инъекцией может быть удовлетворительно описана с использованием свойств статистического самоподобия на основе данных о гранулометрическом составе разделяемой суспензии, а также двух комплексных показателей, характеризующих интенсивность протекающих процессов, для определения которых разработано прикладное программное обеспечение.
4. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что высота рабочей зоны в исследуемых аппаратах является переменной величиной и зависит от тангенциальной скорости на входе в аппарат, относительной скорости инъекционного потока и конструктивных параметров гидроциклона и инжектора.
5. Экспериментально установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления цилиндроконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией может быть принят на основании данных стационарных испытаний аппаратов без инъекции.
6. Показано, что сплит-параметр аппарата зависит от относительного инъекционного расхода, а характер его изменения определяется конструктивными параметрами инжектора.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1. Разработана вероятностно-статистическая модель процесса классификации суспензий в цилиндроконических гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инъекцией и определены границы ее применимости.
2. Даны количественные оценки влияния инъекции на гидродинамику и классификационную способность цилиндроконических гидроциклонов-

классификаторов малых размеров с инъекцией.

3. На примере дисперсной системы «вода – полевой шпат» экспериментально подтверждено наличие «fish-hook» эффекта в процессе разделения суспензий в гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инъекцией и установлена его взаимосвязь с высотой рабочей зоны аппарата.

4. Установлен явный вид безразмерных комбинированных комплексов, однозначно определяющих количественные характеристики непрерывной функции эффективности разделения частиц в аппаратах.

5. Определены характеристики цилиндроконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией, разработана инженерная методика их расчета и прикладное программное обеспечение, применяемое для решения широкого ряда технических задач.

6. Результаты работы внедрены на совместном российско-чешском предприятии ООО «Медиа Инжиниринг», г. Москва (Российская Федерация), г. Либерец (Чешская Республика) при организации основных и вспомогательных технологических и производственных процессов, связанных с классификацией суспензий и реализуемых при выпуске серийной продукции, а также в составе нормативных документов для регламентирования требований, предъявляемых к локальным сооружениям очистки сточных вод, что подтверждено актом о внедрении.

Положения, выносимые на защиту:

1. Вероятностно-статистическая модель процесса классификации суспензий в цилиндроконических гидроциклонах малых размеров с инъекцией и найденный явный вид непрерывной функции эффективности разделения частиц в аппарате.

2. Результаты исследования асимптотических свойств предложенной модели (при $t \rightarrow \infty$) с учетом свойств статистического самоподобия непрерывной функции эффективности разделения частиц в аппарате в интегральной форме.

3. Набор показателей процесса классификации суспензии, характеризующих интенсивность центробежных сил, классификационного воздействия и случайных составляющих процессов и их количественные оценки.

4. Явный вид безразмерных комбинированных комплексов, однозначно определяющих количественные характеристики непрерывной функции эффективности разделения частиц в аппаратах с инъекцией.

5. Результаты экспериментальных и модельных исследований по определению характеристик цилиндроконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией.

6. Уточненный механизм возникновения «fish-hook» эффекта и разработанные методы устранения его негативного влияния на процессы классификации. Взаимосвязь «fish-hook» эффекта с переменной высотой рабочей зоны аппарата.

7. Положение о том, что коэффициент гидравлического сопротивления цилиндроконических гидроциклонах малых размеров с инъекцией может быть принят на основании данных стационарных испытаний аппаратов без инъекции.

8. Методика инженерного расчета цилиндроконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией, применяемая для решения широкого ряда производственных, технических и технологических задач.

Личный вклад автора:

1. Изучены, проанализированы и обобщены теоретические и экспериментальные данные, представленные в научно-технической литературе по рассматриваемой тематике.
2. Разработана математическая модель процесса классификации суспензий в цилиндриконических гидроциклонах малых размеров с инъекцией в пространстве новой обобщенной координаты и аналитически найден явный вид непрерывной функции эффективности разделения частиц в аппарате во всем диапазоне размеров частиц с учетом проявления «fish-hook» эффекта.
3. Определен набор комплексных безразмерных показателей, характеризующих интенсивность классификационного воздействия и центробежных сил по отношению к интенсивности случайных составляющих процессов и однозначно определяющих количественные характеристики непрерывной функции эффективности разделения частиц.
4. При нахождении аналитического вида непрерывной функции эффективности разделения частиц экспериментально подтверждена возможность использования свойств ее статистического самоподобия в интегральной форме.
5. Проведены экспериментальные исследования и определены количественные характеристики работы цилиндриконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией, включая уточнение механизма возникновения «fish-hook» эффекта и методы устранения его негативного влияния на процессы классификации, в том числе при решении экологических задач.
6. Установлена взаимосвязь между «fish-hook» эффектом и высотой рабочей зоны аппарата, которая для гидроциклонов-классификаторов малых размеров является переменной величиной.
7. Установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления цилиндриконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией может быть принят на основании данных стационарных испытаний аппаратов без инъекции.
8. Разработана инженерная методика расчета цилиндриконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией и прикладное программное обеспечение, применяемое для решения широкого ряда технических задач, включая задачи обеспечения экологической безопасности.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на заседаниях кафедры гидромеханики, гидромашин и гидропневмоавтоматики и кафедры экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также на научных семинарах технического факультета Университета Эрланген-Нюрнберг, Германия. Кроме того, результаты работы докладывались на следующих конференциях: 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (Krakow, Poland, 2009); World Conference Series with Virtual Participation: Interdisciplinary Conference on Chemical, Mechanical and Materials Engineering Hosted by Australian Institute of High Energetic Materials in Melbourne (Australia, 2009); Bauman's Russian-French colloquium of young scientists (Moscow, 2009); Второй Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2009); Wissenschaftlich

Seminar der Stipendiaten der Programme «Michail Lomonosov II» und «Immanuel Kant II» 2008/2009 (Moskau, 2009) и 2009/2010 (Moskau, 2010); 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010 (Prague, Czech Republic, 2010); Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред» 16–19 октября (Томск, 2010); XXII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка–2014» (Москва, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ (7,01 п.л./4,77 п.л.), в том числе 6 в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов. Работа содержит 224 страницы, в том числе 206 страниц основного текста, 62 рисунка, 8 таблиц и 191 наименование литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена область исследований и указана цель работы. Рассмотрены методы исследований, а также новизна и практическая ценность работы.

В **первой главе** представлены результаты анализа особенностей практического применения цилиндрикоконических гидроциклонов в составе гидравлических машин, устройств, аппаратов и гидропневмоагрегатов, используемых при решении широкого круга производственных, технических и технологических задач, включая задачи экологии, надежности и безопасности.

Установлены основные характеристики цилиндрикоконических гидроциклонов-классификаторов с инжекцией и рассмотрены особенности их расчета. Представлены основные конструктивные и технологические параметры аппаратов. Показано, что из всего их многообразия наименее изученными следует признать цилиндрикоконические гидроциклоны-классификаторы малых размеров, применяемые для классификации высокодисперсных фракций суспензий.

Проанализированы результаты исследований структуры основных потоков дисперсионной среды в цилиндрикоконических гидроциклонах-классификаторах и особенности движения дисперсной фазы, а также изменение характеристик фракционного разделения в аппаратах циклонного типа при помощи инжекции с учетом «fish-hook» эффекта. Рассмотрены известные подходы к определению характеристик цилиндрикоконических гидроциклонов с учетом влияния интенсивности случайных составляющих процессов.

При этом показано, что существующие методики расчета цилиндрикоконических гидроциклонов-классификаторов с инжекцией не отвечают современным потребностям и требуют своего теоретического и практического завершения.

На основании анализа технической литературы и требований практики сформулирована цель и поставлены следующие **задачи** диссертационной работы:

1. Проведение теоретических исследований процесса разделения суспензии в цилиндрикоконических гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инжекцией и разработка вероятностно-статистической модели этого процесса с

- определением явного вида непрерывной функции эффективности разделения частиц в аппаратах во всем диапазоне крупности частиц.
2. Проведение модельных и экспериментальных исследований гидродинамических и классификационных характеристик цилиндроконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией с учетом конструктивных особенностей аппаратов.
 3. Уточнение механизма возникновения «fish-hook» эффекта и разработка методов устранения его негативного влияния на процессы разделения полидисперсных систем в цилиндроконических гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инъекцией.
 4. Проверка разработанной вероятностно-статистической модели на основе результатов модельных и экспериментальных исследований и выявление особенностей ее практического применения, включая определение характеристик, нахождение границ применимости модели, определяющих величин, комплексных параметров протекающих процессов и взаимосвязи между ними.
 5. Разработка инженерной методики расчета цилиндроконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией, используемой при решении широкого ряда технических задач.

Во второй главе диссертации проведено теоретическое исследование процесса разделения дисперсных систем «жидкость-твёрдое тело» в цилиндроконических гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инъекцией. Представлена вероятностно-статистическая модель гидродинамической стадии эволюции процесса классификации в аппаратах [1] и изучены ее асимптотические свойства [2].

Предложено описывать поведение дисперсной фазы суспензии с помощью функции плотности распределения $f(x,t)dx$, где $x = S/S_0 = R^{n+1}/R_0^{n+1}$ – обобщенная безразмерная координата, определяемая с помощью отношения текущего радиуса R к радиусу цилиндрической части аппарата R_0 и показателем степени n , входящим в закон распределения окружных скоростей в гидроциклоне: $w'_0 R_0^n = w' R^n = const$, в котором w'_0 и w' – тангенциальные компоненты скоростей на входе в гидроциклон и на текущем радиусе R соответственно.

Для частиц с размером $d_u \leq 40$ мкм было получено уравнение для средней скорости движения в радиальном направлении W в виде:

$$W = W' + \tilde{W} = -\left(A_\Sigma S^{\frac{n-1}{n+1}} - \frac{C_\Sigma}{S}\right) + \tilde{W}, \quad (1)$$

где W' – детерминированная составляющая скорости; $\tilde{W}$ – случайная составляющая скорости; $S = R^{n+1}$ – обобщенная координата; $A_\Sigma = (n+1)(A_0 + A_{in})$ – постоянный коэффициент, в котором: A_0 – величина, характеризующая радиальный эффективный расход суспензии; A_{in} – величина, характеризующая инжектируемый эффективный расход дисперсионной среды; C_Σ – коэффициент, характеризующий свойства разделяемой дисперсной системы.

На основании кинетического уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова с учетом уравнения (1) получено выражение для гидродинамической стадии эволюции

процесса классификации в цилиндрикоконических гидроциклонах с инжектором в виде:

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(k \cdot x^{\frac{n-1}{n+1}} - \frac{c}{x} \right) f(x,t) \right] + b \frac{\partial^2 f(x,t)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $k = A_{\Sigma} / S_0^{2/(n+1)}$, $c = C_{\Sigma} / S_0^2$, $b = b_0 / S_0^2$ – коэффициенты, характеризующие соответственно интенсивность классификационного воздействия, центробежных сил и случайных возмущений; $S_0 = R_0^{n+1}$; $b_0 = B/2$; B – коэффициент, определяющий в пространстве обобщенной координаты x интенсивность случайных составляющих, обусловленных турбулентными пульсациями, вероятностью перехода частиц из нисходящего в восходящий поток и обратно, вероятностью взаимодействия частиц различных фракций, наличием зоны циркуляции и другими факторами.

В предельном случае при $n=1$ получено аналитическое решение уравнения (2) для функции распределения $f(x,t)$ в виде:

$$f(x,t) = \left\{ x^{\frac{\Theta}{2}} e^{-\frac{mx}{2}} \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{\Theta \cdot m}{(\Theta + 2i)} x \right)^{\frac{\Theta}{2}} e^{-\frac{\Theta \cdot m}{2(\Theta + 2i)} x} C_i L_i^{(\Theta-1)} \left(\frac{\Theta \cdot m}{(\Theta + 2i)} x \right) \exp \left(-\frac{k^2(\Theta + i)}{b(\Theta + 2i)^2} i \cdot t \right) \right\} \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где $\Theta = c/b$ и $m = k/b$ – определяющие безразмерные комплексы, характеризующие соответственно относительные интенсивности классификационного воздействия и центробежных сил по сравнению с интенсивностью случайных возмущений, C_i – постоянные, которые определяются из условий нормировки и начальных условий, L_i – обобщенный многочлен Лагерра.

В результате исследования асимптотических свойств модели при $t \rightarrow \infty$ получено стационарное распределение частиц размером d_q по безразмерной координате x внутри аппарата при $n \in [0,5, 1]$ в виде:

$$f_{\infty,n}(x) = C_{0,n} \cdot x^{\Theta} \exp \left(-\frac{m(n+1)}{2n} \cdot x^{\frac{2n}{n+1}} \right) = C_{0,n} \cdot x^{\Theta} e^{-m'x^{\alpha}}, \quad (4)$$

где $C_{0,n} = \alpha \cdot m'^{(\theta+1)/\alpha} / \Gamma((\theta+1)/\alpha)$, Γ – гамма функция, $\alpha = 2n/(n+1)$, $m' = m/\alpha$.

Это позволило определить непрерывную функцию эффективности разделения полидисперсной суспензии в гидроциклоне следующим образом:

$$T = T(d_q) = \int_1^{\infty} f_{\infty,n}(x, d_q) dx. \quad (5)$$

В результате исследования свойств статистического самоподобия непрерывной функции эффективности разделения частиц (5) было получено упрощенное выражение, удобное для проведения инженерных расчетов, в виде:

$$T = T(d_q) = \int_1^{\infty} f_{\infty}(r, d_q) dr, \quad (6)$$

где $f_{\infty}(r) = 2C_0 \cdot r^{2\theta+1} \exp(-mr^2)$, $C_0 = m^{\theta+1} / \Gamma(\theta+1)$, $r = R/R_0$ – безразмерный радиус.

В рамках феноменологического подхода установлено выражение для коэффициента b_{d_q} , характеризующего интенсивность случайных составляющих классификационного процесса в виде:

$$b_{d_q} = b_{\Sigma} \exp\left(\frac{d_q}{\bar{d}_q}\right) \cdot \frac{(d_q + l)}{(d_q + \Delta l)}, \quad (7)$$

здесь b_{Σ} – некоторый постоянный коэффициент интенсивности случайных составляющих частиц всех фракций, Δl – изменение эффективного диаметра взаимодействия частиц размером d_q , l – постоянное осредненное изменение эффективного диаметра взаимодействия частиц размера d_q при их «рассеянии» на частицах всех фракций, $\bar{d}_q$ – средний диаметр частиц, которые постоянно присутствуют в рабочей части гидроциклона в стационарном режиме его работы.

По результатам теоретических исследований представлены основные теоретические выводы, сформулированы задачи экспериментальных и модельных исследований настоящей работы.

В третьей главе работы представлены результаты экспериментальных и модельных исследований характеристик цилиндрикоконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инжекцией и величин, входящих в предложенную вероятностно-статистическую модель. Выполнена оценка погрешностей результатов измерений.

Экспериментальные исследования проведены на универсальном стенде (Рис.1,а), который позволяет исследовать образцы гидроциклонов с диаметром цилиндрической части $d_y=50\text{мм}$ (d50) и $d_y=25\text{мм}$ (d25) при одинаковом угле конусности, равным $\theta = 5^\circ$ (Рис.1,б) в диапазоне изменения расходов суспензии $Q=1,7 \cdot 10^{-4} \dots 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ при избыточном давлении на входе в гидроциклон $p < 0,6 \text{ МПа}$ с расходом инжекционного потока $Q_{in}=0 \dots 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ при конструкциях инжектора с радиальным вводом воды через два (R2) и четыре (R4) отверстия, а также с тангенциальным вводом через одно (T1), два (T2) и четыре (T4) отверстия.

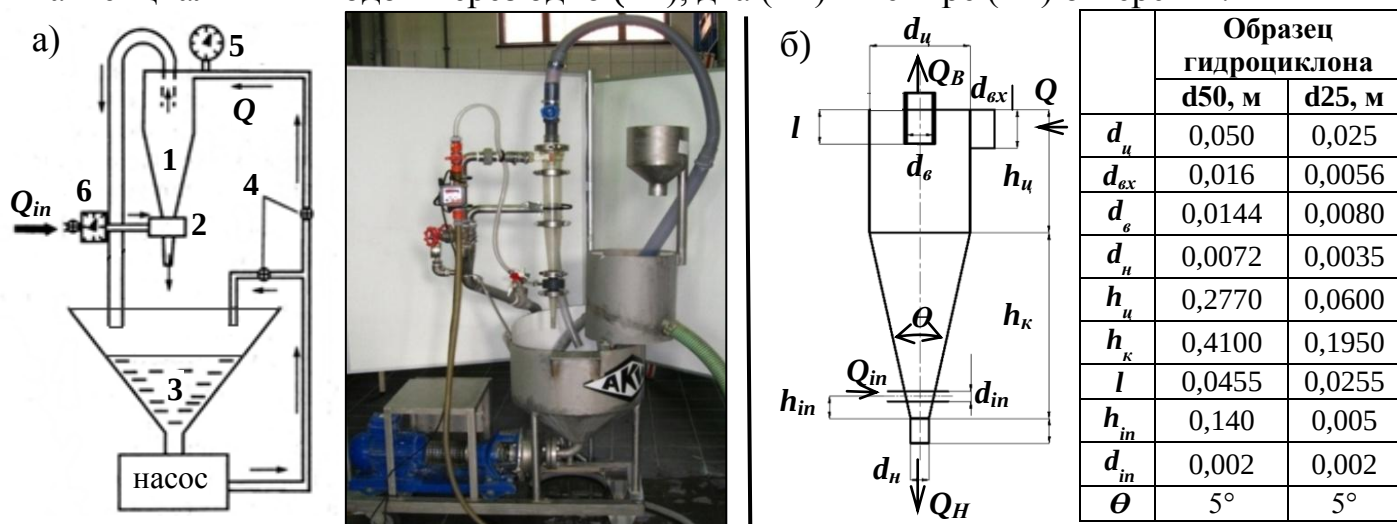


Рис. 1. а) экспериментальный стенд: 1 – гидроциклон; 2 – инжектор; 3 – бак; 4 – вентиль; 5 – манометр; 6 – цифровой расходомер воды; б) схема и размеры образцов цилиндрикоконических гидроциклонов со встроенным инжектором

В качестве материала для приготовления рабочей суспензии в диапазоне концентраций $50 \dots 100 \text{ кг}/\text{м}^3$ был использован полевой шпат с размером частиц $0,4 \dots 100 \text{ мкм}$ и плотностью $2640 \dots 2670 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Определение фракционного состава частиц дисперсной фазы производилось анализатором Malvern Mastersizer 2000 в диапазоне размеров $0,05 \dots 100 \text{ мкм}$.

Результаты исследований технологических характеристик гидроциклонов-классификаторов с инъекцией показали [3], что инъекция практически не влияет на общую производительность аппаратов, которая может быть описана с помощью известной зависимости вида $Q = k' d_{\text{ex}}^2 \sqrt{p}$, где Q – общий расход основного потока на входе в аппарат, p – давление подаваемой суспензии на входе в аппарат, k' – эмпирический коэффициент (Рис.2,а). Здесь и далее на рисунках указаны соответствующие расходы в $\text{дм}^3/\text{мин}$. Установлено, что для исследованных гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией эмпирический коэффициент в системе СИ имеет значение $k' = 1,33 \cdot 10^{-2}$.

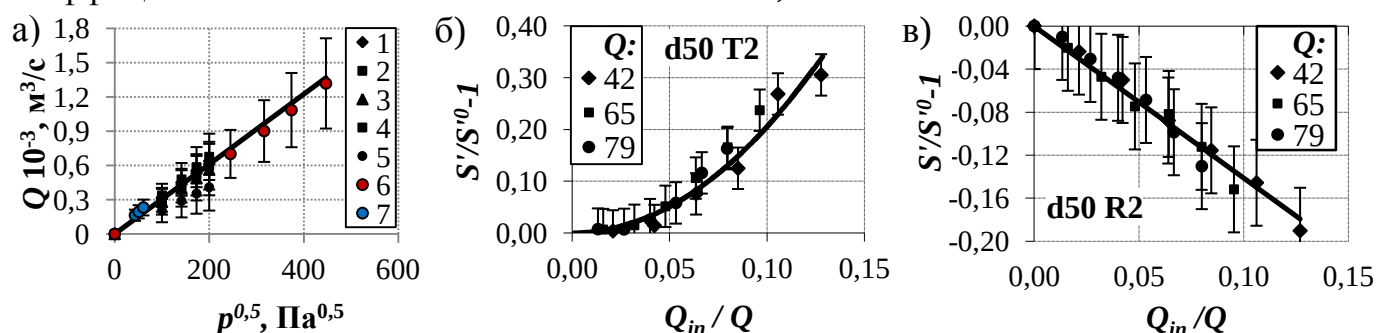


Рис. 2. Результаты исследований технологических характеристик образцов гидроциклонов d50 и d25: а) Q по зависимостям: 1 – М.Г. Аكوпова, 2 – В.А. Замбровского, 3 – В.П. Курбатова, 4 – А.И. Поварова, 5 – Н. Травинского, 6 – экспериментальные данные для d50, 7 – для d25; б) (S'/S^0-1) для d50 T2; в) (S'/S^0-1) для d50 R2, где S^0 – значение сплит-параметра без инъекции, при $Q=7 \cdot 10^{-4}$; $1 \cdot 10^{-3}$; $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

Выполнено исследование влияния инъекции на сплит-параметр $S' = Q_B^{in}/Q_H^{in}$, где Q_B^{in}, Q_H^{in} – расход суспензии в сечении верхнего и нижнего сливов аппарата при наличии инъекции [4,5]. Выявлено влияние определяющих параметров инъекции на перераспределение основного потока между сливными отверстиями (Рис.2,б,в).

В результате численного моделирования структуры потоков в гидроциклоне [6] было установлено, что высота рабочей зоны h_{pz} аппарата изменяется в зависимости от расхода (скорости) основного потока суспензии на входе в аппарат (Рис.3,а), а также от изменения параметров инъекционного потока (Рис.3,б,в).

Полученные результаты позволили представить коэффициенты A_0, A_{in} выражения (1) в виде: $A_0 = Q/(k_0 h)$, $A_{in} = k'_{in} Q_{in}/h$, где h – высота осевого сечения гидроциклона между верхним и нижним сливными патрубками гидроциклона, $k_0 = k_0(Q)$ – коэффициент, учитывающий изменение высоты рабочей зоны аппарата за счет интенсивности основного потока, а $k'_{in} = k'_{in}(Q_{in}, Q)$ – коэффициент, учитывающий изменение высоты рабочей зоны аппарата, обусловленное интенсивностью основного и инъекционного потоков, а также конструкцией инжектора.

В результате суммарный коэффициент интенсивности классификационного воздействия k , входящий в (2), представлен в виде:

$$k = \left(\frac{K_{in}}{k_0} \right) \left(\frac{Q}{h} \right) \left(\frac{(n+1)}{S_0^{\frac{n+1}{2}}} \right), \quad (8)$$

а высота рабочей зоны аппарата определена выражением $h_{pz} = h k_0 / K_{in}$, где $K_{in} = 1 + k'_{in} k_0 (Q_{in} / Q)$ – новый коэффициент изменения высоты рабочей зоны, учитывающий воздействие относительного инжекционного потока.

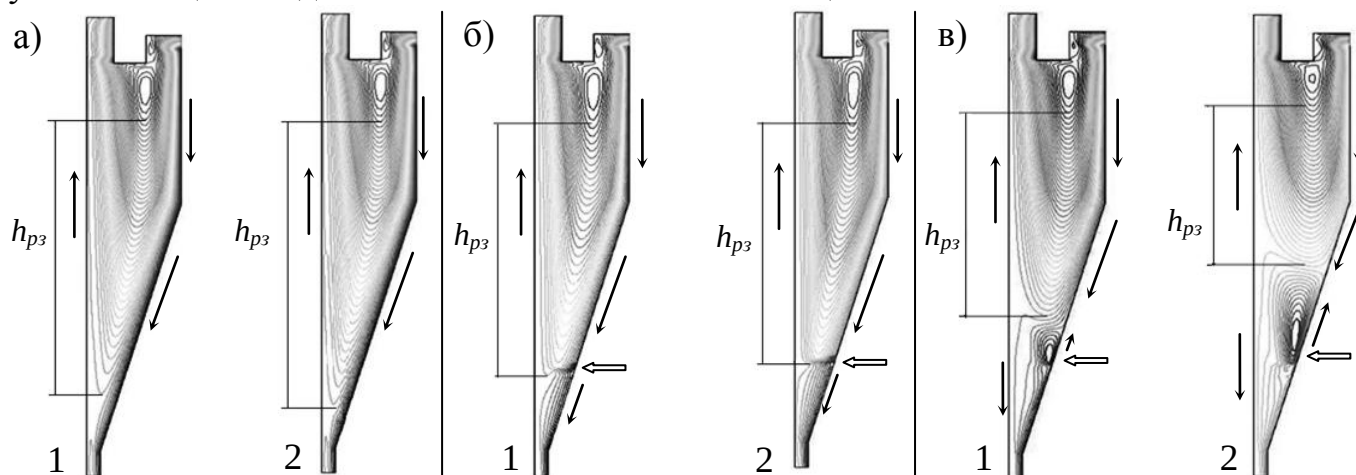


Рис. 3. Результаты численного эксперимента по расчету линий тока внутри аппарата в проекции на плоскость r - z , где r – текущий радиус, z – высота: а) d50 без инжектора, 1 – $Q=9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, 2 – $Q=1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; б) d50 R2; в) d50 T2 при $Q=9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, 1 – $Q_{in}=1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q_{in}=2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ [6]

Результаты комплексных экспериментальных исследований разделяющей способности образцов цилиндрических гидроциклонов-классификаторов с инжекцией представлены на Рис.4,а.

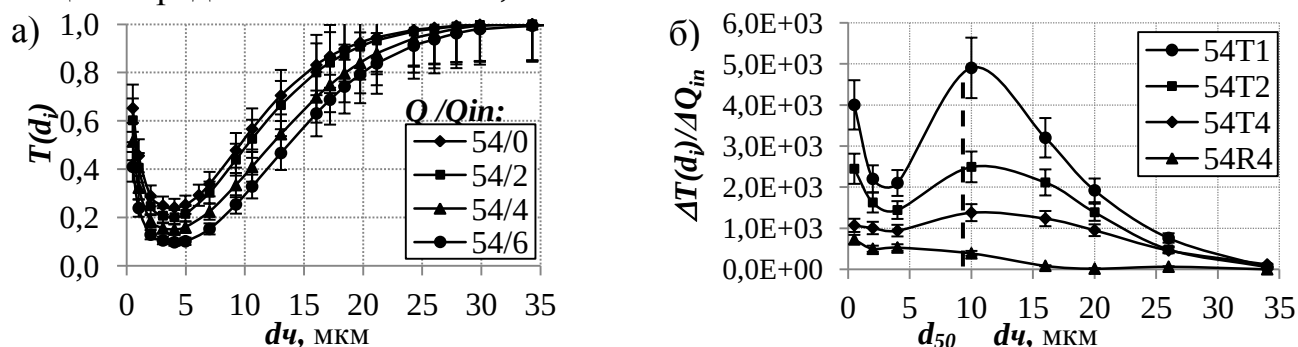


Рис.4 а) Результаты экспериментального определения $T(d_i)$ для d50 T2 при $Q=9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{in}=0; 3,3 \cdot 10^{-5}; 6,6 \cdot 10^{-5}; 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$; б) результаты определения $\Delta T(d_i)/\Delta Q_{in}$ для d50 с T1, T2, T4, R4 при $Q=9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

Обработка экспериментальных результатов (Рис.4,б) в виде зависимости интенсивности изменения $\Delta T(d_i)/\Delta Q_{in}$, позволила качественно подтвердить гипотезу о влиянии гидродинамического взаимодействия частиц различных размеров на появление «fish-hook» эффекта. При этом определены оптимальные конструктивные параметры встроенного инжектора гидроциклона и найдены зависимости для коэффициентов детерминированных и случайных составляющих процесса классификации частиц в аппарате.

В результате определения значений величин, характеризующих детерминированные составляющие процесса разделения суспензии в аппарате, было показано, что с учетом фактора разделения $Fr' = \omega^2 R / g = (w'_0)^2 / gR$ зависимость $k_0 = k_0(Fr')$ (Рис.5,а) может быть представлена в виде:

$$k_0 = 1 - \exp \left(- \frac{0,0106}{(d^{50}/d_u)^{1,143}} \cdot Fr' \right), \quad (9)$$

где d_u – диаметр цилиндрической части рассчитываемого аппарата, $d^{50}=0,05$ м.

Для гидроциклонов-классификаторов малых размеров данные результаты позволили получить следующие обобщенные эмпирические выражения:

$$k_0 = 0,13(d_u / d^{50})^2 w'_0 \quad (\text{Рис.5,б}) \quad \text{и} \quad K_{in} = 1 + 0,26(d^{50}/d_u)^3 (w_{in}/w'_0) \quad (\text{Рис.5,в}).$$

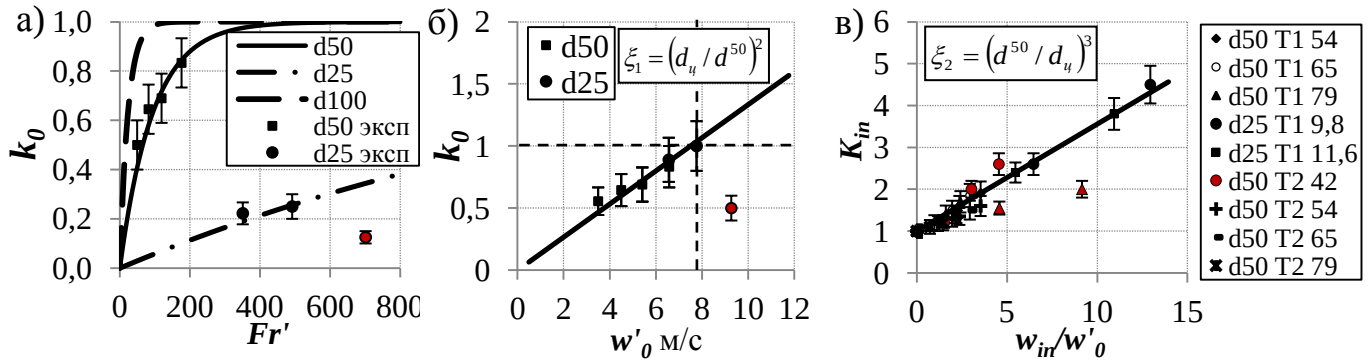


Рис. 5 Результаты определения: а) $k_0 = k_0(Fr')$; б) $k_0 = k_0(w'_0)$; в) $K_{in} = K_{in}(w_{in}/w'_0)$ для d50 T1 и T2 при $Q=7 \cdot 10^{-4}$; $9 \cdot 10^{-4}$; $1 \cdot 10^{-3}$; $1,3 \cdot 10^{-3}$ м³/с и для d25 T1 при $Q=1,6 \cdot 10^{-4}$; $1,9 \cdot 10^{-4}$; $2,3 \cdot 10^{-4}$ м³/с

Определены верхняя и нижняя технологические границы разработанной модели и экспериментально подтверждено, что для гидроциклонов-классификаторов малых размеров высота рабочей зоны аппарата является переменной величиной. На основании представленных данных получено обобщенное эмпирическое выражение для коэффициента интенсивности классификационного воздействия k .

В результате определения значений величин, характеризующих интенсивности случайных составляющих процесса разделения суспензии в аппаратах, получено выражение для коэффициента b_{du} , вычисляемого в соответствии с (7), в которое входят искомые параметры $\bar{d}_u$, l , Δl и b_Σ .

Результаты определения среднего диаметра частиц $\bar{d}_u$, которые постоянно присутствуют в рабочей части гидроциклона, представлены на Рис.6.

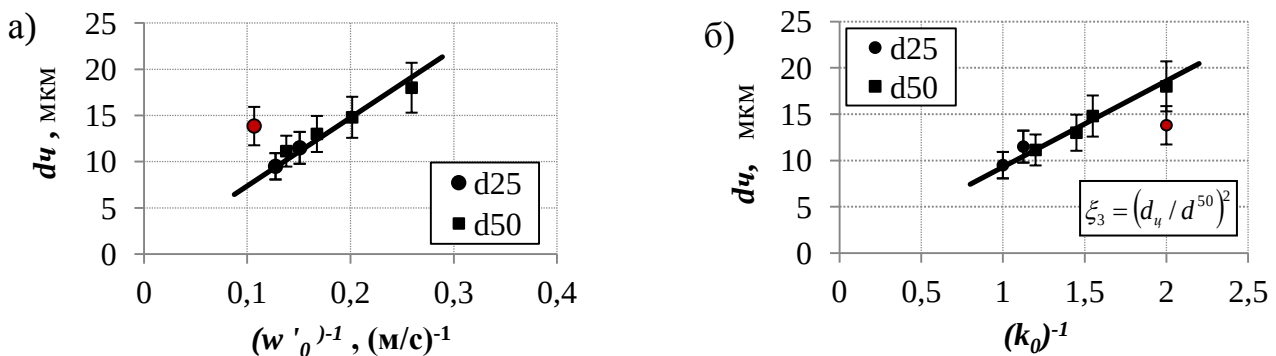


Рис. 6. Результаты определения: а) $\bar{d}_u = \bar{d}_u(1/w'_0)$; б) $\bar{d}_u = \bar{d}_u(k_0)$ для d50 и d25

Для нахождения величины $\bar{d}_u$ предложено эмпирическое выражение вида:

$$\bar{d}_u = 73,84 \cdot (w'_0)^{-1}. \quad (10)$$

Установлено, что значение величины $\bar{d}_u$ практически не зависит от скорости инжекционного потока w_{in} и определяется величиной скорости основного потока

w'_0 (Рис.6,а). Кроме того, получена эмпирическая зависимость $\bar{d}_q$ от коэффициента высоты рабочей зоны $\bar{d}_q = \bar{d}_q(k_0)$ (Рис.6,б) в виде: $\bar{d}_q = 9,3(d_q/d^{50})^2 k_0^{-1}$.

Установлено, что величина $\bar{d}_q$ также может быть вычислена через медианное зерно разделения d_{50} , значение которого определяется по известным зависимостям для гидроциклона без инъекции, в виде:

$$\bar{d}_q = d_{50} / \ln 2. \quad (11)$$

Получена обобщенная нелинейная эмпирическая зависимость для величины изменения эффективного диаметра взаимодействия частиц при отсутствии инъекции (Рис.7,а):

$$l_0 = 0,33 \cdot (d_q/d^{50}) (w'_0)^{3/2}. \quad (12)$$

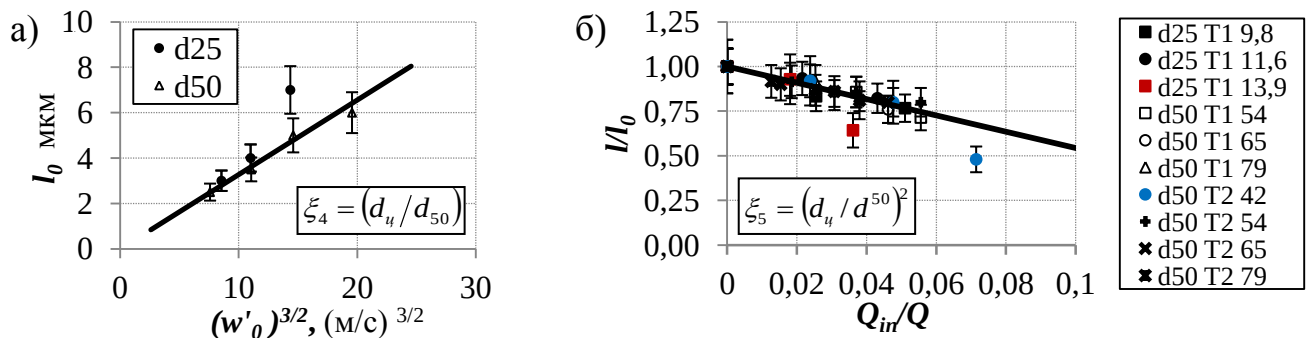


Рис.7. Результаты определения: а) l_0 для d50 и d25 при отсутствии инъекции; б) l/l_0 для d50 при $Q=7 \cdot 10^{-4}$; $9 \cdot 10^{-4}$; $1 \cdot 10^{-3}$; $1,3 \cdot 10^{-3}$ м³/с, для d25 при $Q=1,6 \cdot 10^{-4}$; $1,9 \cdot 10^{-4}$; $2,3 \cdot 10^{-4}$ м³/с

Установлено, что при наличии инъекционного расхода определяющим параметром процесса можно считать относительный расход инъекционного потока Q_{in}/Q , (Рис.7,б):

$$\frac{l}{l_0} = 1 - 4,57 (d_q/d^{50})^2 \left(\frac{Q_{in}}{Q} \right). \quad (13)$$

На основании выражений (12), (13) получена обобщенная эмпирическая зависимость для определения параметра l . Показано, что инъекция уменьшает возможность гидродинамического захвата мелких частиц крупными частицами, что способствует снижению проявления «fish-hook» эффекта.

Найдена взаимосвязь между коэффициентами случайных и детерминированных составляющих процесса разделения (Рис.8).

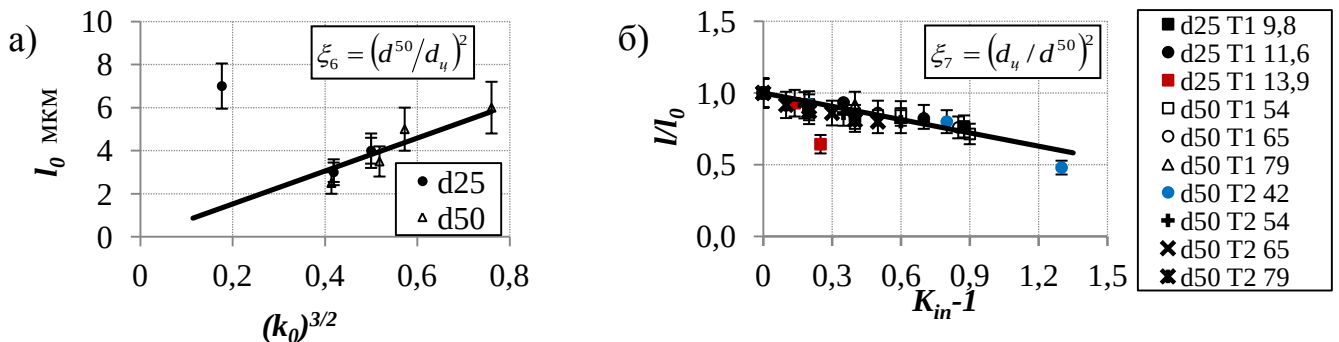


Рис.8. Результаты определения: а) $l_0=l_0(k_0)$ для d50 и d25; б) $l/l_0=l/l_0(K_{in}-1)$ для d50 при $Q=7 \cdot 10^{-4}$; $9 \cdot 10^{-4}$; $1 \cdot 10^{-3}$; $1,3 \cdot 10^{-3}$ м³/с, для d25, $Q=1,6 \cdot 10^{-4}$; $1,9 \cdot 10^{-4}$; $2,3 \cdot 10^{-4}$ м³/с

Установлено, что коэффициент интенсивности случайных составляющих для частиц всех фракций b_{Σ} при несимметричном вводе инжекционной струи (Т1) прямо пропорционально зависит от определяющего параметра w_{in}/w'_0 (Рис.9,а) и может быть представлен в виде зависимости:

$$b_{\Sigma} = 10^{-7} \cdot (d_u / d^{50})^2 (0,174(w_{in}/w'_0) + 1,17). \quad (14)$$

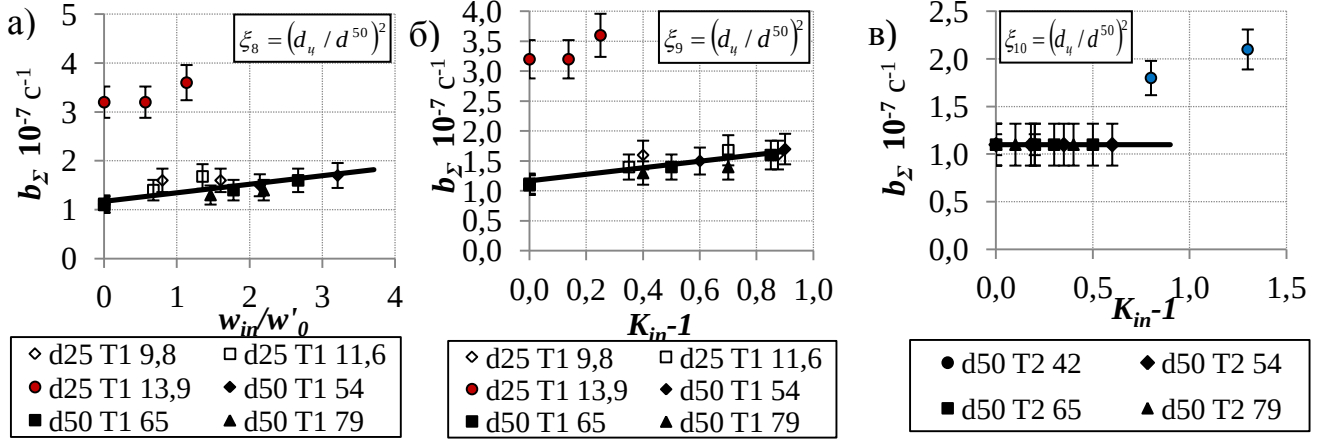


Рис. 9. Результаты определения: а) $b_{\Sigma} = b_{\Sigma}(w_{in}/w'_0)$ для d50 T1 при $Q = 7 \cdot 10^{-4}; 9 \cdot 10^{-4}; 1 \cdot 10^{-3}; 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и d25 T1 при $Q = 1,6 \cdot 10^{-4}; 1,9 \cdot 10^{-4}; 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$; б) $b_{\Sigma} = b_{\Sigma}(K_{in} - 1)$ для d50 T1 и d25 T1 при аналогичных расходах Q ; в) $b_{\Sigma} = b_{\Sigma}(K_{in} - 1)$ для d50 T2 при аналогичных расходах Q

В результате наличие взаимосвязи между величинами K_{in} и w_{in}/w'_0 позволило записать (Рис.9,б):

$$b_{\Sigma} = 10^{-7} \cdot (d_u / d^{50})^2 (0,54 \cdot (K_{in} - 1) + 1,17). \quad (15)$$

Установлено, что для конструкции Т2 величина b_{Σ} не зависит от величины относительной скорости инжекционного потока w_{in}/w'_0 и, соответственно, от величины K_{in} (Рис.9,в), при этом она может быть выражена универсальной эмпирической зависимостью:

$$b_{\Sigma} = 1,17 \cdot 10^{-7} (d_u / d^{50})^2 = \text{const}. \quad (16)$$

Таким образом, конструкция инжектора Т2 позволяет добиться плавности регулирования процесса классификации суспензии и управления «fish-hook» эффектом в гидроциклонах малых размеров при создании автоматизированных систем, тогда как конструкция Т1 является более экономичной.

Экспериментально подтверждена возможность использования свойств статистического самоподобия непрерывной функции эффективности разделения частиц в аппарате в интегральном виде для определения взаимосвязи между величиной n , определяющей гидродинамическую структуру потоков в аппарате, и величиной b_{Σ} , характеризующей интенсивность случайных составляющих в пространстве новой обобщенной координаты S (Рис.10).

Показано, что зависимость для вычисления значения коэффициента b_{d_u} может быть представлена в виде:

$$b_{d_u} = \beta \cdot b_{\Sigma} \left[1 + \left(\frac{l}{d_u + \Delta l} \right) \right] \exp \left(\frac{d_u}{d_u} \right), \quad (17)$$

где $\beta = 2^{-10(n-1)}$ для любых значений $n \in [0,5; 1]$; а b_Σ определяется для $n=1$, что позволяет использовать в расчетах двухпараметрическую зависимость (6).

Сопоставление результатов экспериментальных и расчетных исследований (Рис.11) показывает, что процесс разделения суспензий в цилиндрикоконических гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инъекцией может быть удовлетворительно описан с помощью стационарных решений дифференциального уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова в пространстве новой обобщенной координаты S .

При этом относительная погрешность аппроксимации расчетных зависимостей не превышала относительной погрешности экспериментального определения величины $T(d_i)$ и с вероятностью 0,95 находилась в среднем диапазоне 15%.

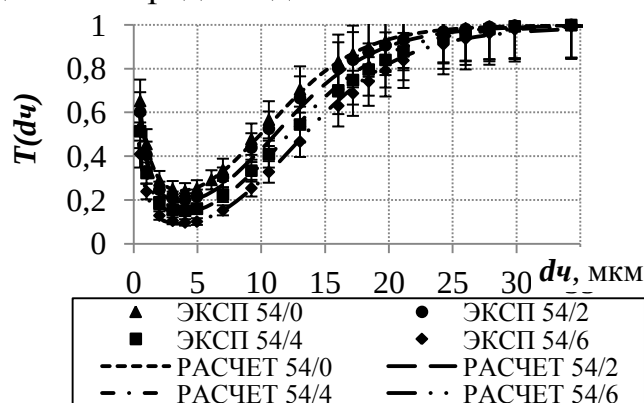
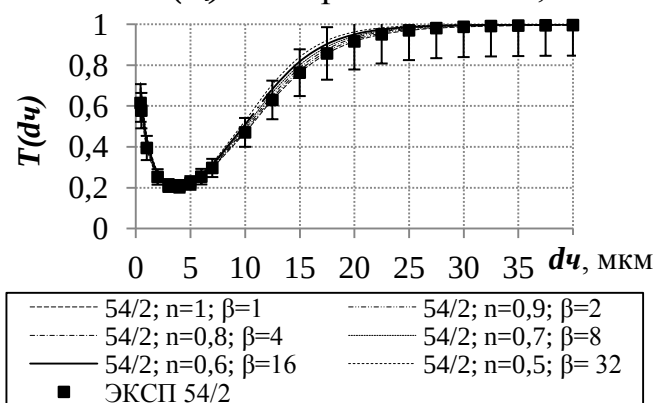


Рис.10. Результаты модельного расчета $T(d_u)$ при различных n и экспериментальных $T(d_i)$ при $Q=9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

Рис.11. Расчетная $T(d_u)$ и экспериментальная $T(d_i)$ для $d_{50} T_2$ при $Q=9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{in}=0; 3,3 \cdot 10^{-5}; 6,6 \cdot 10^{-5}; 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

В четвертой главе с целью практической реализации полученных результатов разработана инженерная методика расчета характеристик цилиндрикоконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией, учитывающая свойства разделяемой дисперсной системы, конструктивные и технологические характеристики аппарата. Представлены блок-схемы определения технологических параметров и разделяющей способности гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией. Приведены примеры практического применения методики расчета. Показано, что разработанная методика позволяет на основании исходных данных с точностью, необходимой для инженерных расчетов, провести не только полный расчет процесса классификации, но и осуществить моделирование с целью оптимизации конечных результатов.

ОБЩИЕ ВЫВОоды

1. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что процесс классификации твердых частиц в цилиндрикоконических гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инъекцией может быть удовлетворительно описан с использованием теории случайных марковских процессов и дифференциальных уравнений диффузионного типа, в частности, с помощью стационарных решений уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова в пространстве новой обобщенной координаты S .

2. Показано, что непрерывная функция эффективности разделения частиц $T=T(d_p)$ цилиндрикоконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией может быть рассчитана с использованием методов статистического самоподобия в интегральной форме.
3. Установлено, что количественные характеристики непрерывной функции эффективности разделения частиц в цилиндрикоконических гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инъекцией могут быть удовлетворительно описаны с использованием двух безразмерных комбинированных комплексов, характеризующих интенсивность классификационного воздействия и центробежных сил по отношению к интенсивности случайных составляющих протекающих процессов.
4. Экспериментально установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления цилиндрикоконических гидроциклонов-классификаторов малых размеров с инъекцией может быть принят на основании данных стационарных испытаний аппаратов при отсутствии инъекции.
5. Экспериментально подтверждено наличие «fish-hook» эффекта и установлена его взаимосвязь с высотой рабочей зоны аппарата, а также уточнен механизм его возникновения на примере дисперсной системы «вода–полевой шпат» и разработаны методы устранения его негативного влияния на процессы классификации суспензий.
6. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что высота рабочей зоны в цилиндрикоконических гидроциклонах-классификаторах малых размеров с инъекцией является переменной величиной и зависит от тангенциальной скорости основного потока на входе в аппарат, относительной скорости инъекционного потока и конструктивных параметров гидроциклона и инжектора.
7. Разработана инженерная методика расчета процесса классификации твердых частиц в цилиндрикоконических гидроциклонах малых размеров с инъекцией, позволяющая существенно расширить поток получаемой информации для последующих процессов оптимизации, а также сократить объем необходимых дополнительных исследований при решении широкого ряда производственных, технических и технологических задач, включая задачи экологии, надежности и безопасности.

Публикации по теме диссертации:

1. Павлихин Г.П., Крохина А.В., Львов В.А. Вероятностно-статистическая модель процесса разделения суспензий в гидроциклонах с дополнительной инъекцией // Безопасность в техносфере. 2012. №2. С. 46–51 (0,38 п.л./0,30 п.л.).
2. Исследование асимптотических свойств модели гидродинамической стадии эволюции процесса классификации в аппаратах циклонного типа / Г.П. Павлихин, В.А. Львов, А.В. Крохина, О.Г. Калугина // Безопасность в техносфере. 2013. №4. С. 36–42 (0,44 п.л./0,35 п.л.).
3. Павлихин Г.П., Крохина А.В., Львов В.А. Гидродинамические характеристики гидроциклона с дополнительным инжектором // Безопасность в техносфере. 2009. № 6. С. 21–25 (0,31 п.л./0,25 п.л.).

4. Дик И.Г., Крохина А.В., Миньков Л.Л. Управление характеристиками гидроциклона дополнительным инжектированием воды // Теоретические основы химической технологии. 2012. Т. 46, №3. С. 342-352 (0,69 п.л./0,35 п.л.).
5. Исследование гидродинамики гидроциклона с дополнительным двухструйным инжектором / А.В. Крохина [и др.] // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, №2. С. 227-235 (0,56 п.л. / 0,45 п.л.).
6. Миньков Л.Л., Крохина А. В., Дик И. Г. Расходные характеристики гидроциклона со встроенным инжектором // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т.18, № 3. С. 413–426 (0,88 п.л. /0,40 п.л.).
7. Миньков Л.Л., Крохина А.В., Дик И.Г. Гидродинамические механизмы влияния инъекции на классификационные характеристики гидроциклона // Инженерно–физический журнал. 2011. Т. 84, №4. С.747–758 (0,75 п.л./ 0,38 п.л.).
8. Миньков Л.Л., Крохина А.В., Дик И.Г. Влияние инжектирования воды на характеристики гидроциклона // Труды Томского университета. Серия физ.-мат. Томск: изд-во Томского университета, 2010. Т.276. С.9-18 (0,63 п.л./ 0,30 п.л.).
9. Experimental and numerical investigation of hydrodynamic characteristics of the hydrocyclone with water injection / J. Dueck, A. Krokina, L. Minkov, Th. Neesse // Separation processes: Summaries 2. 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010. Prague, Czech Republic, 2010. P.800-801 (0,06 п.л./0,05 п.л.).
10. Krokina A.V., Pavlikhin G.P., Dueck J., Study of separation process of classifier hydrocyclone with in-built wash water injector // Materialien zum wissenschaftlichen Seminar der Stipendiaten der Programme «Michail Lomonosov II» und «Immanuel Kant II» 2009/2010. Moskau, 2010. S.94–97 (0,25 п.л./0,22 п.л.).
11. Крохина А.В., Павлихин Г.П., Дик И.Г. Гидродинамика гидроциклона при использовании дополнительной инъекции // Будущее машиностроения России: Эл. сб. тр. второй всероссийской конференции молодых ученых и специалистов, зарегистрирован ФГУП НТИЦ «Информрегистр» № 0320901785. 2009. 1 CD–ROM (PDF) (0,56 п.л./0,50 п.л.).
12. Krokina A.V., Pavlikhin G.P. Additional water injector to control and improve the hydrocyclone classification efficiency // Collection of conference proceedings Bauman's Russian–French colloquium of young scientist. Moscow: BMSTU, 2009. P.12–16 (0,31 п.л./0,25 п.л.).
13. Krokina A.V., Pavlikhin G.P., Dueck J. Hydrodynamic of a cyclone with radial wash water injector // Materialien zum wissenschaftlichen Seminar der Stipendiaten der Programme «Michail Lomonosov II» und «Immanuel Kant II» 2008/2009. Moskau, 2009. S.115–118 (0,25 п.л./0,22 п.л.).
14. Hydrodynamics of a cyclone with wash water injection / J. Dueck, A. Krokina, L.L. Minkov, Th. Neesse // Proc. of 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Krakow, Poland. Krakow: AGH University of Science and Technology Press, 2009. P.1953-1960 (0,50 п.л./0,35 п.л.).
15. Krokina A., Dueck J., Pavlikhin G.P. Hydrodynamic characteristics of hydrocyclone with inbuilt four–jet water injector // Proc. of Interdisciplinary Conference on Chemical, Mechanical and Materials Engineering. Australia, 2009. P.205–211 (0,44 п.л./0,40 п.л.).