

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу Меньшова Евгения Николаевича на тему: "Математическое моделирование разделения ферромагнитных суспензий в магнитных полях", представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

### **1. Актуальность избранной темы**

Актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений. Предметом исследований, на мой взгляд, является моделирование экономичного разделения тонких ферромагнитных суспензий в магнитном поле с помощью высокопроизводительных магнитных сепараторов. Вопросы, встающие при разработке данной темы, остаются весьма сложными для исследований, поскольку наблюдается противоречие между развитием численных методов моделирования при высокой мощности вычислительной техники и низким уровнем разработанности феноменологических и аналитических представлений о поведении в магнитных полях полидисперсных низкоконцентрированных ферромагнитных суспензий (не путать с феррожидкостями с размером частиц в 10-20 раз меньше и при концентрациях более чем в 2 раза меньших, чем у суспензий). Автор не нашел результатов исследований, которые бы описывали поведение таких суспензий в высоко градиентных постоянных магнитных полях.

Это дает основание утверждать, что научная проблема, сформулированная в диссертации, является, безусловно, актуальной. Решение указанной проблемы позволит разработать матаппарат, необходимый для создания высокопроизводительных экономичных компактных сепараторов на постоянных магнитах.

### **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Автор достаточно корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Им изучены и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов по вопросам, связанным с процессом и аппаратами разделения низкоконцентрированных тонких ферромагнитных суспензий в градиентных магнитных полях. Такие суспензии характерны для процессов переработки бедных хвостов, образующихся при обогащении полезных ископаемых (железных руд), очистке СОЖ при холодной прокатке тонкого стального листа, в циклах оборота технологической водной жидкости при горячей прокатке листовой стали, а также при очистке СОЖ в металлообработке. Опытным путем установлено, что близкий результат был получен при расчете значений степени очистки от тонких частиц водных жидкостей в высокоградиентных сепараторах на постоянных магнитах.

Список литературы содержит 269 наименований, обоснованность научных положений соответствует согласованию данных экспериментов и научных выводов. Для подтверждения теоретических положений автором проводятся экспериментальные исследования и численное моделирование.

### **3. Достоверность и новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств и методик проведения исследований. Положения теории основываются на известных достижениях фундаментальных и прикладных научных дисциплин, математике и математической статистике. Особенно удачно они использованы при моделировании эволюции во времени магнитной компоненты из сложных и переменных по размерам и плотности агрегатов, да ещё, при непрерывно усиливающемся экранировании постоянных магнитов трехмерной стержневой решётки.

В работе грамотно используются известные методы моделирования и достигаются совершенно новые результаты. Например, впервые математически описаны магнитная коагуляция и флокуляция ферромагнитной компоненты низкоконцентрированных тонких суспензий в магнитном поле.

Автор корректно вводит новые понятия – например «глубина коагуляции», «двухуровневая суррогатная модель» и т. д.

В качестве новых научных результатов автором выдвинуты положения, регламентирующие многоступенчатый аппарат математического и численного моделирования с помощью комплексов программ, оптимизации процессов разделения магнитных суспензий, необходимых при проектировании магнитных сепараторов.

В целом, результаты, полученные автором являются новыми научными знаниями.

Достоверность теоретических результатов работы подтверждается экспериментальными данными представленными в известных работах Е.М. Булыжева, Г.А. Епутаева, М.В. Зигирняк, В.В. Кармазина, В.И. Килина, А.А. Лютоева, Ю.В. Полянскова, А.В. Сандуляк, А.Б. Солоденко, Л.В. Худобина. Основные результаты диссертации опубликованы в печатных более чем 50 работах. Они неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах и получили одобрение специалистов.

### **4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Весьма значимыми для науки являются полученные автором результаты:

– описывающие причины и механизмы объединения феррочастиц в цепочки с анизотропией вдоль и поперёк силовых линий магнитного поля;

– характеризующие эволюцию ферромагнитной компоненты тонких суспензий во времени при приближении к поверхности экранированного постоянного магнита стержней многокоординатной решётки;

– характеризующие распределение параметров магнитного высокоградиентного неоднородного поля стержневой многокоординатной решётки;

– характеризующие параметры сепараторов для очистки водных сред от тонких полидисперсных ферромагнитных примесей.

Особо значимой для практики является возможность создания с помощью вышеуказанных научных результатов методов и методик моделирования, расчета, оптимизации и проектирования высокоэффективных патронных магнитных сепараторов для очистки водных сред от тонких феррочастиц.

## **5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты и выводы диссертации будут полезными при разработке множества высокоэффективных процессов и аппаратов для очистки водных жидкостей от тонких ферромагнитных частиц, в магнитных высокоградиентных полях, созданных с помощью постоянных магнитов.

К таковым относятся процессы и аппараты из областей практики:

– обогащение полезных ископаемых – бедных руд и хвостов;

– очистки водных технологических жидкостей в оборотных циклах прокатных станов при получении стального листового и профильного проката;

– очистка оборотных вод промпредприятий с помощью тонких адсорбционных порошков из ферромагнитных антикоррозийных сталей и др.

Поэтому практическая полезность и востребованность результатов работ не подлежит сомнению.

## **6. Оценка содержания диссертации и ее завершенность**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и семи приложений.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы и дана краткая характеристика диссертационной работы.

### **В первой главе:**

Проведен анализ основных технологических, схемотехнических и конструктивных решений реализации процесса магнитного разделения ферромагнитных суспензий; уточнена классификация ферромагнитных суспензий по составу и свойствам; выявлено, что решающую роль при выборе схем разделения играет крупность и равномерность распределения ферромагнитных частиц в объеме.

Показано, что наименее изученная фаза процесса разделения ферромагнитной суспензии выражается в виде магнитной флокуляции или в виде магнитной коагуляции. В первом случае происходит образование прядей (ориентированных вдоль силовых линий магнитного поля), во втором случае феррочастицы в результате сближения слипаются в цепочечные и нитевидные агрегаты.

Сформулированы основные направления исследований. Установлено, что магнитная коагуляция является одним из основных процессов, характеризующих эволюцию состояния дисперсной системы. Выявлено, что сложнейшей фундаментальной задачей при исследовании коагуляции является стохастика эволюции характеристик распределения дисперсного состава, т.е. вопросы математического моделирования магнитной коагуляции принципиально не решены.

**Во второй главе** строго обоснован метод математического моделирования многопараметрического семейства аperiodических характеристик интегральными кривыми ЛДУ на основе аппроксимации исходного семейства экспоненциальным многочленом с нерегламентированными показателями степени и с последующим эквивалентным преобразованием однородного ЛДУ в неоднородное ЛДУ пониженного порядка. Разработанная автором методика позволяет выразить постоянные интегрирования общего решения приведенного ЛДУ через параметры семейства исходных характеристик.

Разработанный автором алгоритм и примеры реализации метода для классов задач со статическими исходными данными и с изменяющимися исходными данными. Метод использован для аппроксимации семейств характеристик качества очистки и в алгоритме оптимизации конструктивных параметров высокопроизводительных магнитных сепараторов водных технологических жидкостей.

**В третьей главе** представлена разработка схемного метода численного моделирования распределения характеристик силового поля, создаваемого решеткой из постоянных магнитов.

Сформирована соответствующая система уравнений и распределённая схема магнитной короткозамкнутой цепи постоянного магнита, преобразованная далее в схему с сосредоточенными параметрами. Разработан экономичный алгоритм и программа расчёта трехмерного распределения основных характеристик магнитного поля в рабочем пространстве магнитного сепаратора. Определена точность выполняемых расчётов.

Выявленная автором анизотропия сил взаимодействия магнитных диполей во внешнем поле (сил притяжения вдоль силовых линий и сил отталкивания в поперечном направлении), квалифицирована как основная физическая причина объединения феррочастиц в магнитном поле в устойчивые агрегаты нитевидной формы. Обоснована возможность обезвоживания осадка на поверхности магнитных стержней (патронов). При перемагничивании происходит скачкообразная перестройка прядеобразных

агрегатов, сопровождающаяся раскрытием стыков освобождением и ранее заземленной в них жидкости. Последовательное перемагничивание приводит к высокой эффективности обезвоживания.

**В четвертой главе** разрабатываются научные основы магнитной сепарации на базе математического моделирования характеристик качества очистки ВТЖ от феррочастиц для одно- и многорядных магнитных стержневых сепараторов. Проведено моделирование траектории одиночной частицы в водном потоке низкоконцентрированной суспензии под воздействием сил высокоградиентного магнитного поля. Корректно обосновано преобразование исходной нелинейной системы в приближенное неоднородное ЛДУ. В рабочей области разделения суспензии выявлены характерные зоны формирования траектории феррочастицы в зависимости от ее размера. Проведенный анализ использован при имитационном моделировании семейств зависимостей степени очистки ВТЖ. Определена погрешность моделирования характеристик.

**В пятой главе** показано математическое моделирование магнитной коагуляции с позиции детерминированно-вероятностного подхода, на основе привлечения математической операции свертки функций распределения случайных величин. Метод моделирования, осуществляемый в четыре этапа, позволил сформировать уравнения для расчета основных характеристик магнитной коагуляции: весовой функции, глубины коагуляции и параметров распределения дисперсного состава агрегатов при равномерном и градиентном магнитных полях. Установлена адекватность математических моделей по критерию Фишера.

**В шестой главе** представлены, разработанные и реализованные автором, метод параметрической оптимизации и методики расчёта высокопроизводительных патронных магнитных сепараторов, а также полученные результаты экспериментальных исследований спроектированных сепараторов.

**В седьмой главе** представлены завершающие цикл исследований разработки магнитных патронных сепараторов с организацией движения блока шламосьемных манжет по прерывистому циклу. Благодаря периодической переориентации структур прядей из феррочастиц перемещаемых с помощью манжет по поверхности магнитных патронов и попеременному раскрытию стыков организуется истечение воды из осадка. Обезвоживание осадка способствует снижению потерь СОЖ и многократному уменьшению расхода концентрата.

Оптимизация расстояния между патронами и скорости движения потока жидкости через решетку патронов, чередование полюсов магнитов и выбор высококоэрцитивного материала магнитов обеспечивают значительное снижение стоимости, а, следовательно, их доступность для предприятий.

**В заключение** представлены основные результаты работы и перспективы диссертационного исследования. Название диссертации верно и

корректно отражает её содержание, а материалы достаточно полно отражены в научных публикациях автора.

## 7. Оценка содержания диссертации, её завершенность в целом, замечания по оформлению

Содержание работы полностью достигает поставленную цель, решает, вытекающие из неё задачи исследований. В работе получены необходимые для практики выводы и рекомендации, благодаря которым обеспечивается использование результатов работы в научных, проектных и производственных организациях.

Диссертация представляет собой завершенную работу и состоит из введения, семи глав, заключения с основными выводами, списка литературы и приложения. Работа составляет 398 страниц, в том числе 338 страниц основного машинописного текста, включает 106 рисунков, 49 таблиц и списка литературы из 269 наименования.

Диссертация обладает целостностью и внутренним единством.

Язык и стиль работы технически грамотный. Изложение материала логически связано и структурно обосновано. Разделы работы взаимосвязаны. Текстовый материал хорошо подготовлен и иллюстрирован. В целом оформление соответствует новым стандартам.

Содержание диссертации соответствует автореферату и указанной специальности 05.13.18; поскольку в ней:

- **разработаны** новые математические методы моделирования объектов и явлений (п.п. 1-3, 5-8 "Научная новизна");

- **выполнены** качественные и приближенные аналитические исследования математических моделей (п.4 "Научная новизна", глава 4);

- **реализованы** численные методы и алгоритмы в виде комплексов проблемно ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов (п.4 Значимость работы для практики на основе п.п. 3,8 "Научная новизна" главы 2-6);

- **проведены** комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента;

- **разработаны** новые математические методы и алгоритмы интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели (например, анализ влияния магнитной коагуляции на характеристики осаждения ферросмесей, глава 5);

- **представлено** решение задачи конструктивного совершенствования магнитных сепараторов на основе оптимизации магнитных патронов (глава 7).

При анализе диссертации и автореферата выявлены следующие замечания по их оформлению:

1. Пункты 8 и 9 «Научной новизны» целесообразно отнести к разделу «Значимость работы для практики».

2. Положения, выносимые на защиту в количестве 15 мелкодробных формулировок целесообразно было бы, на взгляд оппонента, укрупнить, скорректировав их с теми главами диссертации, где они обосновываются.

3. Первая глава перегружена описанием конструктивных и схмотехнических решений.

4. Автором не очень чётко проведён раздел между моделированием феррожидкостей (коллоидных растворов) и исследуемых ферромагнитных суспензий; не показано различие целей и задач, что и определяет различие подходов к моделированию.

5. Автор пренебрег возможностью моделирования с помощью метода конечных элементов и апробированных программ. Возможно, было бы проще осуществить численные методы.

6. Автор не показал, каким образом могут быть использованы его разработки в других областях знаний, например, с помощью алгоритмов и т.д.

7. Работа перегружена частными решениями, которые можно было бы вынести за рамки текста диссертации, например, с помощью ссылок на статьи и т.д.

Однако сделанные замечания не снижают качества выполненной диссертации, которое является достаточно высоким.

## **8. Заключение по диссертационной работе**

Диссертационная работа Меньшова Е.Н. на тему «Математическое моделирование разделения ферромагнитных суспензий в магнитных полях» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые основы и аппарат математического моделирования, новые математические модели, численные методы и комплексы программ, которые обеспечивают получение новых схмотехнических и конструктивно-технологических решений патронных магнитных сепараторов, имеющих существенное значение для развития различных отраслей народного хозяйства.

Тема диссертационной работы без сомнений актуальна, а полученные результаты исследований обладают научной новизной и практической значимостью. Материал диссертации представлен достаточно четко, структурирован, обладает внутренним единством, изложен на грамотном техническом языке с использованием общепринятой терминологии.

Положения, выводы и рекомендации работы обоснованы и достоверны. Автореферат диссертационной работы правильно отражает содержание диссертации и дает возможность судить о целях и задачах исследования, научных выводах и результатах.

Считаю, что работа по своему содержанию, объему, актуальности, научной и практической значимости полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, установленным в п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением

Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – Меньшов Евгений Николаевич – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические).

**Официальный оппонент:**

Доктор технических наук, профессор  
кафедры машин и оборудования нефтяной  
и газовой промышленности,  
ФГБОУ ВО "Ухтинский государственный  
технический университет"

21.04.2021г.



Быков Игорь Юрьевич

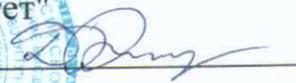
Специальность: 05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (нефтяной и газовой промышленности)

E-mail: [bykov1939@mail.ru](mailto:bykov1939@mail.ru)

Тел: +7 (909) 120-66-55

Адрес: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13

Подпись Быкова И.Ю. подтверждаю,  
Ученый секретарь Ученого совета, к.т.н., доцент ФГБОУ ВО "Ухтинский  
государственный технический университет"



Борейко Д.А.