

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание учёной степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Меркулова Дмитрия Игоревича**  
**на тему: «Направленное движение как следствие деформации**  
**намагничивающихся сред в магнитных полях»**  
**по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Диссертационная работа Меркулова Д.И. посвящена исследованию различных способов создания движения за счёт деформации поверхности магнитной жидкости или формоизменения намагничивающихся (магнитоактивных, если использовать более известное название) эластомеров в однородном магнитном поле.

Созданы образцы (спирали) и системы тел (гантели) из мягких намагничивающихся полимерных композитов. Показано, что при определённых режимах приложения однородного магнитного поля эти объекты способны совершать направленное движение. Таким образом, эти системы следует рассматривать как прототипы магнитоуправляемых мобильных роботов, в том числе микроминиатюрных. Экспериментально и теоретически исследовано их движение вдоль дна сосуда с немагнитной жидкостью в однородном наклонном переменном магнитном поле.

Создан прототип насоса-дозатора на основе взаимодействия магнитной жидкости и тела из намагничивающегося эластомера в однородном магнитном поле. Перекачивание жидкости происходит за счёт подъёма магнитной жидкости, стимулированного присутствием тела из полимерного композита, под действием приложенного поля. Теоретически и экспериментально изучено перекачивание немагнитной жидкости за один цикл работы насоса.

Проведены эксперименты по исследованию левитации (подъёма) тела из намагничивающегося эластомера, которую создаёт капля магнитной жидкости, на поверхности которой находится тело. Эта задача существенно отличается от стандартной постановки, когда тело погружено в неограниченный (или большой) сосуд. Задача нетривиальна, а полученные наблюдения и объясняющие их расчёты могут послужить основой для создания магнитоуправляемого клапана.



Во всех рассмотренных устройствах могут быть использованы тела из намагничивающегося эластомера. Поэтому в диссертации экспериментально и теоретически изучены деформации и реологические свойства намагничивающихся эластомеров.

Направленность диссертации Д.И. Меркулова на создание теоретических основ магнитоуправляемой микротехники (мобильных роботов, дозаторов и клапанов) очевидна. Эта область переживает в настоящее время чрезвычайное оживление: многочисленные статьи выходят в таких высокорейтинговых журналах как Nature и Advanced Materials. Поэтому **актуальность** работы не вызывает сомнений. Отдельно отметим, что изложение каждой из собранных в диссертации задач содержит не только теоретический анализ, но включает и значительный авторского экспериментального материала. Тем самым показана **достоверность** полученных результатов.

**В первой главе** диссертации описаны объекты из намагничивающихся полимеров – пружины (спирали) и гантели – и продемонстрирована их способность двигаться вдоль горизонтальной плоскости под действием наклонного переменного однородного магнитного поля. Важно отметить, что использование однородного магнитного поля позволяет уменьшать размеры тела: на режим движения не влияет размер источника поля, который здесь находится достаточно далеко от «предмета» управления. Обнаружено и объяснено существенное влияние вязкости окружающей жидкости на движение указанных объектов (они могут рассматриваться как прототипы микроботов). Вслед за качественным объяснением дано теоретическое описание смены знака перемещения в зависимости от вязкости окружающей среды. Для того, чтобы разобраться в этой, по сути, весьма многопараметрической задаче построена упрощённая теоретическая модель и продемонстрирована её работоспособность.

**Во второй главе** предложен прототип насоса-дозатора, в котором в качестве поршня, поднимающего перекачиваемую немагнитную жидкость, выступает поверхность магнитной жидкости, внутри которой находится тело из намагничивающегося материала; последнее служит концентратором приложенного поля. Показана возможность управления этим устройством с помощью однородного переменного поля. Построены экспериментальные и



теоретические зависимости объёма перекачиваемой жидкости от величины магнитного поля. Получено хорошее совпадение теории и эксперимента.

В этой же главе экспериментально и теоретически исследована левитация сферического намагничивающегося тела в капле магнитной жидкости под действием однородного вертикального магнитного поля. Обнаружено существование максимального объёма (при фиксированном поле), по превышении которого односвязный объем магнитной жидкости распадается. Также при фиксированном объёме магнитной жидкости обнаружено наличие минимального магнитного поля, которое могло бы удерживать каплю магнитной жидкости под намагничивающимся телом. Эти выявленные в эксперименте закономерности объяснены теоретически, а результаты выполненных измерений подтверждены численными расчётами.

Все вышеупомянутые и иные приложения, использующие отклик магнитной жидкости и/или намагничивающихся эластомерных композитов на приложенное поле можно рассматривать как сочетание двух фундаментальных эффектов: формоизменение в однородном внешнем поле (суммарная магнитостатическая сила равна нулю) и деформирование под действием неоднородного поля (суммарная магнитостатическая сила отлична от нуля). Названные варианты магнитного управления изучены в **третьей главе** работы Д.И. Меркулова. А именно: теоретически исследована деформация сферического тела в однородном поле; экспериментально и теоретически изучены деформации тонких тел в неоднородном поле. Показана возможность существования нескольких устойчивых равновесных форм (бистабильность и мультистабильность) таких тел в магнитном поле фиксированной конфигурации и величины. Применительно к нестационарным воздействиям – целый ряд рассмотренных выше задач предполагает использование переменного поля – выяснена роль процессов вязкоупругой релаксации. Вклад эффектов запаздывания наглядно показан на примере вынужденных торсионных колебаний цилиндров из намагничивающихся эластомеров. Из полученных данных найдены модули упругости и коэффициенты внутренней вязкости, определены зависимости этих материальных параметров от величины приложенного осевого поля.



Что касается элементов **новизны** работы. Они, безусловно, присутствуют и существенны. Во-первых, это обнаруженное и объяснённое влияние вязкости окружающей жидкости на направление движения прототипов мобильных роботов. Во-вторых, это эксперимент и его объяснение относительно нетривиального варианта левитации, когда поддержку объекта обеспечивает конечная капля магнитной жидкости. В-третьих, это развёрнутое исследование возможных режимов мультстабильности формы объектов из намагничивающихся эластомеров. Новизну полученных результатов диссертации подтверждает также предваряющий оригинальную часть работы подробный обзор литературы по данной тематике.

**Достоверность** полученных данных вытекает из использования автором классических методов феррогидродинамики и механики при построении теоретических моделей. Обоснованность полученных выводов подтверждена сравнением теоретических и экспериментальных результатов и оценкой погрешности экспериментальных изменений, полученных автором. Результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых научных изданиях.

Автореферат с должной полнотой отражает содержание диссертации и представляет её результаты.

Замеченные мною дефекты диссертационной работы:

1. При теоретическом описании движения мобильного робота, состоящего из двух стальных сферических тел, соединённых упругим приводом (Глава 1), учитывалась только деформация привода на сжатие-растяжение. У читателя нет уверенности в том, что изгибная мода не изменит теоретические выводы.
2. Существенным элементом конфигурации насоса-дозатора (Глава 2) является «намагничивающееся сферическое тело». Поскольку в работе повсеместно речь идёт о намагничивающихся эластомерах, то по умолчанию представляешь себе, что этот элемент конструкции как раз таков. Однако из знакомства с ходом решения видишь, что, скорее, имеется в виду шар из твёрдого ферромагнетика (типа пермаллоя), который не имеет остаточной намагниченности. Между тем, явное указание с самого начала на природу материала «сферического тела» позволило бы избавит читателя от всякого недоумения.



3. В автореферате есть забавные несоответствия. Так, в поз. 7 списка трудов автора в статье, где Д.И. Меркулов единственный автор, его авторский вклад указан равным 35%. Другое, в поз. 9 того же списка авторский вклад Д.И. Меркулова оказывается равным 1 п.л.

Однако сделанные замечания никак не влияют на общую позитивную оценку работы. Диссертация Д.И. Меркулова представляется мне законченным научным исследованием, содержание и результаты которого изложены хорошим литературным языком; результаты представлены корректно и могут найти применение в работе следующих организаций: НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Юго-Западный государственный университет, Ивановский государственный энергетический университет, Белорусский национальный технический университет.

По результатам работы опубликовано девять статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Публикации в полной мере соответствуют содержанию диссертационной работы.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Таким образом, соискатель Меркулов Дмитрий Игоревич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
Лаборатории динамики дисперсных систем

