

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Мандрыкина Сергея Дмитриевича «Течения жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил и сил плавучести», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационную работу, как мне кажется, легче всего понять и оценить, рассматривая ее в контексте двух противоположных и одинаково неадекватных мнений, бытующих среди людей, далеких от механики жидких металлов. Согласно первому из них в экспериментальной работе можно измерить все, что тебе хотелось бы знать. Согласно другому мнению, получив в руки достаточно мощный компьютер, ты можешь рассчитать все, что тебе захочется. Не то, чтобы в этих мыслях совсем не было здравого зерна, но действительность неизмеримо более сложна, чем она предстает в этих суждениях. Достаточно сказать, что измерениям мешает непрозрачность жидких металлов, а вычислительному подходу препятствуют низкие числа Прандтля (высокая теплопроводность), которая делает динамический погранслой существенно более тонким, чем температурный погранслой. Разумеется, есть и всевозможные иные осложнения. Диссертация начинается с понятного и убедительного разъяснения того, какие трудности возникают на обоих намеченных выше путях и как трудно их преодолевать. Мне кажется, что вопрос о разумном сочетании экспериментальных и вычислительных подходов при работе с течениями жидких металлов представляет большой и фундаментальный научный интерес. Его разрешение возможно лишь в рамках конкретной научной задачи, но опыт решения подобных проблем в серии логически связанных научных задач представляет большой интерес для широкого круга специалистов. Все это, с моей точки зрения, определяет **актуальность** диссертационной работы, а ее, с моей точки зрения, успешное выполнение определяет мою общую высокую оценку работы.

В качестве конкретной **цели своей работы** автор избирает численное и экспериментальное исследование влияния различных осложняющих факторов на течения жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил и сил плавучести. Подобная постановка вопроса представляется естественной как в практическом, так и в теоретическом аспекте. Меня лично очень привлекает изучение сил плавуче-

чести — это, как мне кажется, очень малоисследованный вопрос, который постоянно возникает в различных астрофизических задачах. Про силы плавучести астрофизики высказывают самые разнообразные и плохо совместимые точки зрения, так что прояснение этих вопросов экспериментально очень желательно. Мне кажется, что автор диссертации своей работой во многом способствует прояснению этих накопившихся вопросов.

**Научная новизна** результатов, полученных в работе, не вызывает сомнений. Не вдаваясь здесь в детали, можно сказать, что исследование отталкивается от интересных и ранее исследованных в простейших случаях сюжетов, но проводит их детальное и во многом исчерпывающее рассмотрение. Например, при исследовании электровихревых течений галлиевой эвтектики рассматриваются неизученные ранее конфигурации при несогласованных топологии течения и геометрии емкости.

Очевидно, что исследования, проведенные автором могут **применяться** для решения различных прикладных задач, связанных с течением жидких металлов — такие задачи в избытке присутствуют в металлургии, а также важны для изучения работы жидкометаллических батарей. Однако мне хочется отметить менее очевидные области, в которых работа может **быть интересна**. Это астрофизика и геофизика, где тоже возникают задачи о течении жидких металлов в ограниченных областях, а в случае течений проводящей среды во внешнем ядре Земли мы в прямом смысле имеем дело с ограниченной областью. Разумная параметризация эффектов плавучести — давняя мечта астрофизиков и геофизиков. Конкретное содержание диссертационной работы подтверждает, что автор видит важность своих результатов для геофизики — отмечено, что при конфигурации магнитного поля, типичной для Земли, возникает диапазон значений напряженности магнитного поля, в котором сначала развивается основное полоидальное течение, а затем его энергия резко уменьшается. Это и в самом деле интересное и перспективное замечание.

Сформулированные автором защищаемые положения убедительны и ясны. Их **обоснованность и достоверность** обоснована с помощью разумного сочетания численных и экспериментальных подходов, что само по себе представляет сильную сторону работы. Очевиден также **личный вклад** автора — в работе очень подробно написано, что именно сделал автор. Хочется подчеркнуть, что в работах подобного рода совершенно

нереально работать одному исследователю, но автор подробно и хорошо описывает, что сделал именно он.

Разумеется, работа не лишена некоторых недостатков. Мне не кажется правильным описывать, что еще автор мог бы сделать, прояснить или как еще можно было бы переформулировать сделанные им выводы. Очевидно, что степень исследованности различных течений жидких металлов такова, что подобный список можно было бы продолжить практически до бесконечности. Тем не менее, о работе можно сформулировать некоторые конкретные **критические замечания**. Мне кажется, что в подобных работах нужно внимательно следить за выполнением стандартов оформления научных работ на русском языке. В самом деле, диссертации как правило во многом формируются как обратный перевод с английского, а в английской научной литературе приняты во многом иные стандарты. В частности, не стоит писать с большой буквы слова типа рисунок или заключение, если они, конечно, не стоят в начале фразы. Говоря о менее технических вещах, я бы посоветовал автору быть немного менее сдержанным и дополнить свое очень сдержанное описание важности изучаемых эффектов более расширительными фразами, которые поясняют важность полученных выводов. Это сделано в отмеченном выше замечании о роли магнитных сил для перестройки течений во внешнем ядре Земли и это сразу делает текст заметно более интересным и привлекательным.

В диссертации, конечно, есть и **другие мелкие погрешности**, неудачные выражения, неточности и т.д., однако они ни в какой мере не определяют качество работы, так что я не буду на них более подробно останавливаться.

В работе приведен убедительный список различных (и далеко не только отечественных) научных организаций, в которых проводятся подобные исследования и этот список, естественно, можно рассматривать как список организаций, для которых работа может представлять интерес.

Перечислю некоторые конкретные результаты, которые кажутся мне наиболее выигрышными.

Это, прежде всего, обнаружение нелинейной немонотонной зависимости интенсивности циркуляции натрия и эффективности теплопереноса от наклона цилиндра в задаче о термогравитационной конвекции жидкого

натрия в цилиндре.

Очень интересно обнаружение того, что внешнее аксиальное магнитное поле, генерирующее азимутальное течение металла, приводит к сильному подавлению электровихревого течения. Интересно и убедительно выяснение природы этого подавления.

Мне кажется очень любопытным и вывод о том, что наложение магнитного поля, направление которого параллельно линии, соединяющей электроды в задаче об электровихревом течении приводит к закрутке металла вблизи электродов и увеличивает как общую интенсивность течения, так и пульсации скорости.

Вообще, мне кажется, что диссертант работает систематически и в очень хорошем стиле, так что все сформулированные им выводы производят впечатление фундаментальности и надежности. Это — явное свидетельство того, что диссертант принадлежит к хорошей научной школе, имеющей давние и глубокие традиции.

Результаты, полученные в диссертационной работе С.Д.Мандрыкина прекрасно опубликованы. В **списке работ** по теме диссертации шесть работ в журналах, рекомендованных ВАК, причем это очень солидные и известные журналы. Среди этих публикаций есть статья в журнале *Journal of Fluid Mechanics*. Каждый специалист в данной области прекрасно знает, что в этот журнал просто невозможно пробиться с работой, которая не выполнена на уровне лучших международных стандартов. С моей точки зрения, одно наличие этой статьи уже достаточно для фиксации высокого научного уровня диссертанта. Безусловно, наличие статьи в журнале *Physical Review* тоже очень способствует формированию такого позитивного вывода.

Сформулируем неформальный вывод из этого обзора содержания диссертации — мы имеем дело с отличной работой, достойно продолжающей традиции школы, из которой она вышла.

Теперь перейдем к формальной оценке диссертации.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертация С.Д. Мандрыкина отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.1.9 – механика

жидкости, газа и плазмы, а ее автор, С.Д.Мандрыкин, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Доктор физико-математических наук,  
профессор



Дмитрий Дмитриевич Соколов

15.10.2021

Адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские  
горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет МГУ  
Телефон: +7(495)4254526  
Эл. адрес: sokoloff.dd@gmail.com

18.10.2021

Подпись Дмитрия Дмитриевича Соколова удостоверяю.

Декан физического факультета МГУ

профессор



Н.Н. Сысоев