

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Павлинова Александра Михайловича «Экспериментальное исследование турбулентных потоков жидких металлов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

В последние десятилетия магнитная гидродинамика, являющаяся составной частью механики жидкостей, газа и плазмы, достигла нового исторического рубежа – стали доступными экспериментальные исследования систем с магнитными числами Рейнольдса от единицы до десятков. Другими словами, стало возможным экспериментировать в ситуации, когда индукционные эффекты заметно превышают диссипативные. Конечно, магнитные числа Рейнольдса в небесных телах и космических средах могут быть еще на порядки больше, но определился вектор развития и чисто фундаментальные или астрофизические обсуждения того, как ведет себя в подобных условиях магнитное поле, получили экспериментальную верификацию. Теперь не стоит вопрос о том, могут ли, например, возникать в потоке проводящей жидкости режимы с хаотической сменой полярности, известные из палеомагнитных наблюдений геологов, – их существование является экспериментальным фактом, полученным в динамо экспериментах. Впечатляющий прогресс очевиден. Однако было бы странно, если бы такое фундаментальное достижение оказалось замкнуто в рамках чисто фундаментальной науки и не нашло выходы в исследования, имеющие прикладную составляющую. Такое развитие хотя и естественно, но совершенно не очевидно. Перекинуть мостик от экспериментальных установок, ориентированных на демонстрацию фундаментальных физических эффектов, к прикладным задачам – сложная, тяжелая и не всегда благодарная задача. Именно в этой области лежит работа диссертанта. Он развивает в этом направлении замечательные фундаментальные достижения своих коллег и обращает их к прикладным вопросам, сохраняя фундаментальную составляющую исследования. **Актуальность подобной работы** не вызывает сомнения, она естественным и разумным образом развивает достижения коллег диссертанта из научной школы магнитной гидродинамики, сложившейся в Перми.

В качестве конкретной цели своей работы автор избирает создание

систем измерения скорости, магнитного поля и температуры в потоках жидкого металла, возбуждаемых различными способами, отработку методик измерения и проведение измерений в конкретных потоках жидкого металла. Важность решения этих задач представляется очевидной.

**Степень новизны** полученных результатов хорошо характеризуется тем, что в составе диссертации присутствует работа, в которой впервые экспериментально подтверждено существование турбулентного диамагнетизма в турбулентном потоке хорошо проводящей жидкости. Это явление было теоретически предсказано Я.Б.Зельдовичем в 1956 г., обсуждалось в самых разнообразных контекстах в различных теоретических работах, но до недавнего времени рассматривалось как совершенно недоступное для экспериментальной проверки. В сущности, решения одной такой давно стоящей задачи вполне достаточно для присуждения искомой степени, и на этом вполне можно было бы закончить анализ диссертации. В данной диссертации это фундаментальное достижение занимает почетное, но не исключительное место. Ничем не хуже и следующее достижение – впервые метод лоренцевой расходометрии применен для измерений в потоке жидкого металла с магнитным числом Рейнольдса, превосходящим единицу. Для решения обеих задач была использована уникальная экспериментальная установка, позволяющая создавать импульсные турбулентные течения жидкого натрия высокой интенсивности. Предыдущая модификация данной установки уже была использована для измерений турбулентной вязкости и изучения  $\beta$ -эффекта. По всей видимости, базовые элементы установки остались теми же. Однако это не умаляет сложности проведённой работы. Высокая химическая активность среды, экстремальные механические перегрузки и высокие температуры требуют тщательной проработки каждого элемента измерительных систем, что и было осуществлено автором. Поскольку исследуемые явления являются довольно тонкими, потребовалось накопление большого объёма экспериментальных данных. В порядке **критического замечания** скажу, что не понимаю, почему диссертант пишет слово "лоренцевой" с большой буквы.

В диссертации ясно рассказано, почему и как полученные результаты могут **применяться** для решения конкретных технических проблем. Для исследования течений в технологических устройствах автор разрабатывает и создаёт специальную измерительную систему, цель которой – по-

лучение информации при наличии помех высокой интенсивности. Полученные экспериментальные данные, как бы то ни было, остаются сильно зашумленными. Следует отметить, что результаты измерений мелкомасштабных свойств течения в области непосредственного влияния индуктора переменного магнитного поля, в принципе не могут быть свободны от помех. Несмотря на это, предложенный метод анализа данных на основе вычисления вейвлет кросс-корреляций позволил найти степень влияния помех на сигналы датчиков и определить масштабы, на которых это влияние минимально, а сигналы дают корректную информацию о свойствах турбулентности. Большой интерес представляют и результаты исследования движения фронта кристаллизации при различных способах и интенсивностях электромагнитного воздействия на металл. Измерения проводились с использованием ультразвукового допплеровского анемометра. Этот уникальный прибор позволяет бесконтактно получать информацию о распределении неоднородностей и скорости течения, при этом он имеет большое число управляющих параметров. Тонкая настройка прибора требует большого опыта работы с устройством. Локализация положения фронта была осуществлена также с помощью вейвлетов. Всё это говорит о владении автором современных методов измерения и обработки экспериментальных данных. Очень красиво и полезно применение проведенных измерений для верификации кодов, применяемых для расчета потоков жидкого натрия в технических устройствах. Сама идеология верификации кодов с помощью специальных экспериментальных исследований является хотя и естественным, но достаточно неожиданным развитием сложного вопроса о достоверности данных, получаемых в рамках прямого численного моделирования. Этот раздел диссертации **интересен** не только специалистам по механике жидкостей, но и специалистам по вычислительной математике и математическому моделированию.

Проведенные автором исследования в принципе не могут быть предметом чисто индивидуальных усилий. В диссертации содержится краткое и убедительное, хотя и далеко не исчерпывающее, объяснение этому факту. По требованиям техники безопасности измерения должны проводиться командой из четырех человек. Тем не менее автор ясно указывает, в чем именно состоял его **личный вклад**, а читатель хорошо видит, что автор глубоко и тонко разбирается в предмете.

Сформулированные автором защищаемые положения убедительны и ясны. Еще раз скажу, что одного обнаружения турбулентного диамагнетизма было бы достаточно для защиты. В то же время чисто редакционно **не все положения сформулированы удачно**. Например, методика по измерению чего-либо сама по себе не кажется защищаемым положением. Лучше было бы написать о создании оригинальной методики измерения. Разумеется, это замечание имеет редакционный характер и не снижает качества диссертации – в конце концов, диссертация не по изящной словесности.

Результаты, полученные в диссертационной работе А.М.Павлинова прекрасно опубликованы. В **списке работ** по теме диссертации восемь работ в журналах из списка ВАК. Напомню, что речь идет не о теоретической, а об экспериментальной диссертации, а в экспериментальной науке публикации даются гораздо труднее, чем в теоретической. Скажу честно, что в этом впечатляющем списке даже вполне добrotная публикация в Вестнике Нижегородского университета (а это – очень известный университет, причем именно в данной области науки) кажется слабым звеном. У меня **вызывает некоторые вопросы** формат представления публикаций в списке. Дело в том, что в выбранном формате фамилия докторанта иногда теряется в сокращении "и др." (точнее, в его английском аналоге – среди публикаций много работ в иностранных журналах). Я понимаю, что это сделано по утвержденным правилам, но от этого не легче. Наверное, лучше изменить правила.

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.

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 А.М.Павлинова отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор, А.М.Павлинов, несомненно заслу-

живает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Доктор физико-математических наук,  
профессор

Дмитрий Дмитриевич Соколов



25.10.2016

Адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»  
Телефон: + 7(495)4254526  
Эл. адрес: sokoloff.dd@gmail.com

25.10.2016

Подпись Дмитрия Дмитриевича Соколова удостоверяю.

Декан физического факультета МГУ

профессор

Николай Николаевич Сысоев

