



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Санкт-Петербургский политехнический  
 университет Петра Великого»  
 (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,  
 ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251  
 тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080  
 office@spbstu.ru

№ \_\_\_\_\_  
 на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ:

И.О. проректора  
 по научно-организационной деятельности  
 Санкт-Петербургского политехнического  
 университета Петра Великого,  
 доктор технических наук

Ю. С. Ключков

« 22 » октября 2021 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» 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 специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

**Актуальность темы диссертационной работы.** Диссертация С.Д. Мандрыкина посвящена исследованию конвекции и электровихревых течений жидких металлов в замкнутых полостях при варьировании и/или включении различных факторов, могущих существенным образом изменять структуру течения. В качестве факторов, влияние которых изучается в диссертационной работе, выступают геометрические параметры полости, расположение электродов и внешние силовые поля. Актуальность исследований данной направленности обусловлена как фундаментальным значением углубленного понимания структуры нестационарного вихревого течения жидкого металла при различных условиях, так и задачами разработки реальных технических устройств, в которых исследуемые факторы могут играть ключевую роль.

**Цель работы** С.Д. Мандрыкина заключалась в численном и экспериментальном изучении влияния ряда осложняющих факторов на течения жидких металлов в замкнутых цилиндрических полостях, развивающиеся под действием электромагнитных сил или сил плавучести. Эта цель достигалась

посредством обстоятельного рассмотрения нескольких задач, а именно: термогравитационной конвекции жидкого натрия в полости при варьировании ее наклона; электровихревого течения жидкого металла в удлиненной цилиндрической полости с боковым токоподводом; электровихревого течения жидкого металла в полости различной высоты с осесимметричными электродами, включая влияние слабого внешнего магнитного поля.

**Научная и практическая значимость результатов работы.** Научная и практическая значимость диссертационной работы С.Д. Мандрыкина определяется тем, что полученные автором численные и экспериментальные результаты, с одной стороны, способствуют более глубокому пониманию особенностей турбулентной термоконвекции жидких металлов при различных значениях угла между направлением силы тяжести и градиентом температуры, а с другой стороны - формированию базовых представлений о возможных механизмах управления пространственно-временной структурой электровихревых течений посредством использования нестандартных конфигураций подвода тока, выбором аспектного отношения емкости и/или наложением внешних магнитных полей.

**Научная новизна результатов работы** состоит, прежде всего, в том, что в ней (1) получен большой объем новых численных данных о трехмерной турбулентной конвекции жидкого натрия в цилиндрической емкости при ранее не рассматривавшихся значениях числа Релея и Прандтля и при варьировании в широких пределах угла наклона емкости относительно вектора силы тяжести; (2) экспериментально, в отсутствие и присутствии внешнего магнитного поля, изучено электровихревое течение галлиевой эвтектики в ранее не исследованной конфигурации, обуславливающей рассогласование топологии течения и геометрии емкости; (3) посредством параметрических вычислений получены новые данные о структуре электровихревого течения жидкого металла в цилиндрических полостях различного аспектного отношения с осесимметричными электродами и показано, что электровихревое течение наиболее интенсивно при малых значениях аспектного отношения; установлено также, что даже слабое внешнее аксиальное магнитное поле, генерирующее азимутальное движение жидкого металла в полости, приводит к подавлению полоидального электровихревого течения.

**Структура и общая характеристика работы.** Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения и списка литературных источников. Работа изложена на 118 страницах текста, включая 49 рисунков и библиографический список из 139 наименований работ.

Во Введении обосновывается актуальность и практическая значимость темы диссертации, формулируются ее цель и конкретные задачи, дается общая характеристика используемых для их решения методов и формулируются основные научные результаты работы и положения, выносимые автором на защиту. Приводятся список конференций и семинаров, на которых докладывались результаты работы, а также описывается личный вклад С.Д. Мандрыкина в диссертационное исследование.

Далее дан достаточно полный обзор современного состояния исследований термоконвективных и электровихревых течений жидкого металла в замкнутых полостях. Показывается, что сегодня повышенный интерес к исследованиям данного вида течений обусловлен современными тенденциями в энергетике, в частности все более широким использованием жидких металлов в ядерно-энергетических установках, а также интересом к разработке жидкометаллических батарей, служащих для накопления энергии в системах так называемой «зеленой» электроэнергетики. Освещаются подходы и успехи последних лет в численном моделировании термогидродинамики жидких металлов.

В первой главе диссертации представлены результаты численного исследования турбулентной термогравитационной конвекции жидкого натрия в цилиндрической полости единичного аспектного отношения с разнонагретыми торцевыми стенками. Параметрические вычисления с варьированием наклона оси цилиндра относительно вектора гравитации проведены автором на основе метода моделирования крупных вихрей (LES) при числе Релея около  $10^7$ , с применением свободно распространяемого, хорошо верифицированного пакета OpenFOAM. Показано, что при любых углах наклона полости в ней, на фоне разночастотных турбулентных пульсаций, развивается крупномасштабная циркуляция (КМЦ), при этом наибольшая скорость среднего течения соответствует наклону в  $50^\circ$ , а наименьшая — наклону в  $90^\circ$ . При вертикальном положении цилиндра наблюдается особо сложная трехмерная динамика КМЦ.

Во второй главе представляются результаты численного и экспериментального изучения электровихревого течения в цилиндрическом объеме жидкого металла при локализованном токоподводе к боковой стенке с использованием двух противоположно расположенных электродов. Автор справедливо отмечает, что в этом случае общая структура электровихревого течения оказывается рассогласованной с геометрией полости — из-за того, что ось симметрии возникающего течения не совпадает с осью симметрии полости. Посредством лабораторных экспериментов и численного моделирования в работе показано, что электровихревое течение жидкого металла, возникающее в цилиндрической полости с боковым оппозитным токоподводом, нестационарно во всем рассмотренном в работе интервале значений

силы тока (от 200 до 500 А в эксперименте и от 50 до 1000 А в расчетах). В отсутствие внешнего магнитного поля течение представлено двумя тороидальными вихрями. В результате экспериментов установлено также, что наложение магнитного поля, направление которого параллельно линии, соединяющей электроды, приводит к закрутке металла вблизи электродов и к росту как общей интенсивности течения, так уровня пульсаций скорости.

Третья глава посвящена численному решению задачи об электровихревом течении галлиевого сплава, находящегося в цилиндрических емкостях с различным аспектным отношением; рассматривается случай осесимметричных торцевых электродов. Сила тока варьировалась в пределах от 10 до 1000 А. В результате расчетов установлено, что электровихревое течение при всех рассмотренных значениях параметров задачи имеет полоидальный вид. Обнаружено также, что существует особый, квазистационарный режим течения, который реализуется при токах ниже некоторого критического значения, а последнее зависит от аспектного отношения емкости. Отличительная особенность этого режима заключается в сохранении в среднем формы крупномасштабного вихря на временных масштабах, существенно превосходящих характерное время процесса (периода оборота вихря).

В четвертой главе представляются результаты численного исследования влияния слабого внешнего однородного магнитного поля на электровихревое течение жидкого металла в цилиндре с аспектным отношением  $1/2$ . Как и в предыдущей главе, течение создается в осесимметричной конфигурации, но в данном случае в качестве второго электрода выступает вся боковая стенка цилиндра. Полученные результаты наглядно свидетельствуют о том, что в отсутствие внешнего магнитного поля развивается полоидальное ЭВТ в виде одного крупномасштабного вихря, а азимутальное течение практически не выражено. Если же к системе приложено слабое внешнее магнитное поле (порядка поля Земли), то наблюдается весьма интересный переходный процесс, в котором сначала развивается основное полоидальное течение, а затем его энергия резко уменьшается, становясь на два порядка меньше энергии азимутального, обусловленного внешним полем. Показано также, что при увеличении интенсивности внешнего вертикального магнитного поля азимутальное вращение среды в полости развивается настолько быстро, что полоидальное течение не формируется вовсе.

В Заключении формулируются основные результаты работы.

В качестве **замечаний** по диссертации можно отметить следующее.

1) Введенный в главе 1 термин «полное число Рейнольдса» неудачен. Более того, неясно, что собственно характеризует это «полное число Рейнольдса»,

зависящее от угла наклона полости (рис.1.10а). Для обобщения данных вполне достаточно введенного автором «крупномасштабного» числа Рейнольдса, построенного по характерной скорости среднего движения и характерному размеру полости. С другой стороны, введенное третье, «мелкомасштабное» число Рейнольдса, оценивается по характерной скорости «фоновой» пульсационного движения и глобальному линейному масштабу (размеру полости), но ведь последний не характеризует линейный масштаб наиболее энергоемких турбулентных пульсаций, т.е. присутствует некоторая непоследовательность. Представляется, что более последовательным было бы использование непосредственно отношения двух вычисленных средних по объему скоростей: это отношение наглядно характеризовало бы общую интенсивность «фоновой» турбулентности.

2) Представленные в главе 2 результаты численного моделирования получены на основе полуэмпирической RNG k-epsilon модели турбулентности (с применением CFD пакета ANSYS Fluent), однако определяющие уравнения магнитной гидродинамики даются (параграф 2.3) только в исходном виде: без последствий приложения процедуры осреднения по Рейнольдсу и введения изотропной турбулентной вязкости, переменной по пространству. Отсутствует информация об использованной схеме для расчета конвективных потоков, выбор которой существенно влияет на качество получаемого численного решения.

3) В отличие от расширенных экспериментов, проведенных при участии автора для электровихревого течения в удлиненной цилиндрической полости с боковым токоподводом, численное моделирование выполнено автором лишь в отсутствие внешнего магнитного поля. В этом случае информация о том, что в использованной вычислительной модели «Внешнее магнитное поле катушек Гельмгольца считается постоянным и однородным» (параграф 2.3) приводится некстати.

4) Отсутствие списка обозначений несколько затрудняет проработку материала диссертации.

Высказанные замечания относятся к представлению материала на страницах диссертации и не изменяют общего положительного впечатления о работе, выполненной С.Д. Мандрыкиным. Она представляет собой обстоятельное научное исследование актуальных задач современной гидродинамики и содержит ряд существенных новых научных результатов, имеющих важное практическое значение. Работа прошла широкую апробацию на конференциях и семинарах, а ее основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание и основные результаты.

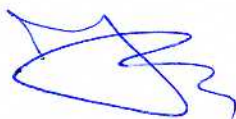
Таким образом, можно констатировать, что работа С.Д.Мандрыкина удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой

степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, С.Д.Мандрыкин, заслуживает присуждения искомой степени.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**  
Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы в российских образовательных и научных организациях, проводящих исследования в области экспериментального и численного моделирования течений электропроводной жидкости (МЭИ, СПбПУ, ОИВТ РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, НИИЭФА и др.).

Отзыв рассмотрен и одобрен на семинаре научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) гидроаэродинамики Физико-механического института (ФизМех) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), состоявшемся 6 октября 2021 года в СПбПУ (протокол №4 от 06.10.2021).

Заведующий НИЛ гидроаэродинамики ФизМех СПбПУ,  
кандидат физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа  
и плазмы)



Иванов Николай Георгиевич

тел. +7 (812) 552-6621, email: ivanov\_ng@spbstu.ru

Гл. научный сотрудник НИЛ гидроаэродинамики ФизМех СПбПУ,  
профессор Высшей школы прикладной математики  
и вычислительной физики ФизМех СПбПУ,  
доктор физико-математических наук – Механика жидкости, газа и плазмы, профессор



Евгений Михайлович Смирнов

тел. +7 (812) 552-6621, email: smirnov\_em@spbstu.ru

**Сведения об организации:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

+7 (800) 707-18-99; office@iamm.spbstu.ru; http://www.spbstu.ru