

На правах рукописи.

Поклонский Евгений Васильевич



МАГНИТО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ
ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

01.04.08 - ФИЗИКА И ХИМИЯ ПЛАЗМЫ.

Автореферат

диссертации на соискание ученой
степени кандидата физико-мате-
матических наук.

Харьков - 1993



1027.7

Робота виконана в Харківському інженерно-будівельному інституті і Харківському філіалі відділення магнітодинаміки і теплофізики ОНТІ АН України

Наукові керівники - доктор фізико-математических наук, професор Панченко Іван Петрович
- кандидат фізико-математических наук Бернштам Володимир Аронівич.

Офіційні опоненти - доктор фізико-математических наук, професор Володимиров В.В. (Інститут фізики АН України)
доктор фізико-математических наук Куклін В.М. (Харківський державний університет)

Ведущая организация ИРЭ АН Украины

Защита состоится ~~24~~ мая 1993г. в 16³⁰ часов
на заседании специализированного Совета Д.053.06.01
Харьковского государственного университета
(310108, г. Харьков, пр. Курчатова, 31 ауд. н 301)
С диссертацией можно ознакомиться в Центральной
научной библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан "7-апреля" 1993г.

Ученый секретарь специализированного
совета, доцент

В.И. Лапшин
В.И. Лапшин

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время ведутся интенсивные исследования в области управляемого термоядерного синтеза. Характерной особенностью разрабатываемых термоядерных установок является большие тепловые нагрузки на конструктивные элементы. Во многих проектах для защиты наиболее напряженных в тепловом отношении участков предполагается применение жидких металлов для создания самовозобновляющихся поверхностей, защитных завес и т.д., принимающих на себя потоки энергии. Существует по крайней мере три основных типа таких систем: с пленками жидкого металла, стекающими по подложке, со свободно падающими пленками или струями и с потоками капель. Имеются предложения по защите лимитера или пластин дивертора токамака стекающей по ней пленкой жидкого металла; существуют предложения по защите первой стенки импульсного лазерного термоядерного реактора жидкометаллической пленкой. Весьма широк спектр предложений по использованию струйных и капельных жидкометаллических защит в будущих термоядерных установках. Так в одном из проектов термоядерной установки на релятивистских электронных пучках (РЭП) рассматривался вариант с применением жидкометаллического защитного устройства, получившего название "бланкет-магнит". Оно представляет собой систему жидкометаллических струй сложного сечения, по которым пропускается электрический ток, и предназначенного как для обеспечения транспортировки РЭП к мишени, так и для защиты

первой стенки реакторной камеры и наработки трития. Существуют и другие предложения по использованию струйных и пленочных жидкометаллических течений. Жидкометаллические токонесящие струи кругового сечения применяются в электрических коммутаторах большой мощности, используемых, в частности, в униполярных генераторах тока, а также в ряде технологических процессов химической промышленности и металлургии.

Во всех этих приложениях течение пленок и струй происходит в магнитном поле (внешнем или индуцированном), в условиях протекания по пленкам и струям тока (приложенного извне, вызванного термо-э.д.с., возникшей вследствие неоднородности температуры и контакта разнородных металлов), в контакте с плазмой. В некоторых из них магнитное поле является необходимой составной частью установки, в других - применяется для стабилизации и управления движением электропроводной жидкости. В первом случае движение жидкометаллической пленки осуществляется по пластинам специальных устройств - дивертора или диафрагмы. Во втором - по стенке реакторной камеры. Для создания работоспособных установок необходимо знать условия потери устойчивости ламинарного течения пленки, зависимость параметров течения (толщина пленки, форма свободной поверхности) от внешних условий, характеристики возникающего при определенных условиях волнового режима течения, возможность управления параметрами течения с помощью приложенных магнитного поля и/или тока. В технологических устройствах и процессах с использованием струй важным является сплошность струй и сохранение ими своей формы. Разрушение струй в результате развития неустойчивостей приводит к невозможности осуществления

технологического процесса, а существенные деформации сечения струй приводят к отклонениям параметров процесса от номинальных. Все это стимулировало большой интерес к этой области магнитной гидродинамики.

Ц е л ь р а б о т ы. Целью настоящей диссертационной работы является теоретическое исследование некоторых магнито - гидродинамических аспектов создания защитных устройств термоядерных реакторов. К ним, в частности, относится устойчивость слоя электропроводной жидкости и ламинарного течения пленки электропроводной жидкости, стекающей по твердой подложке (пластине дивертора или лимитера, первой стенке лазерного импульсного термоядерного реактора), во внешнем постоянном магнитном поле, в частности, при наличии контакта с плазмой; исследование влияния МГД эффектов на переходный участок установления однородного течения; исследование влияния внешнего магнитного поля на форму свободной поверхности пленки. Кроме того в диссертации исследованы устойчивость систем плоских струй жидкого металла (бланкет-магнит импульсного термоядерного реактора) и МГД неустойчивости жидкометаллических струй круглого сечения с учетом некоторых особенностей физических свойств токопроводящей жидкости.

Н а у ч н а я н о в и з н а. В работе впервые рассмотрено влияние контакта с плазмой на устойчивость ламинарного течения пленки электропроводной жидкости. Впервые исследование устойчивости токнесущих струй проведено с учетом намагниченности проводящей магнитной жидкости и зависимости

поверхностного натяжения жидкого металла от температуры. Исследования не рассматривавшаяся ранее неустойчивость системы плоских струй с чередующимися токами.

Научная и практическая ценность результатов. Полученные в работе результаты определяют ряд параметров необходимых при проектировании систем защиты энергонапряженных участков перспективных энергоустановок, сильноточных коммутаторов, ресурсосберегающих установок для металлургии. На основании проведенных исследований разработан ряд технических предложений, защищенных тремя авторскими свидетельствами. Полученные в работе в рамках линейной теории результаты дают возможность построения нелинейной теории волн на поверхности пленки жидкого металла, текущей в магнитном поле в контакте с плазмой.

Основные положения выносимые на защиту.

1. Исследовано влияние контакта с плазмой на устойчивость жидкометаллической пленки в магнитном поле. Установлено, что контакт с плазмой стабилизирует жидкометаллическую пленку, текущую по пластине дивертора

2. Исследовано влияние магнитных свойств электропроводной жидкой среды на устойчивость струи с током. Показано, что токонесящая струя магнитной жидкости более устойчива чем аналогичная струя жидкого металла.

3. Определен инкремент неустойчивости системы жидкометаллических плоских токонесящих струй.

4. Исследовано влияние термотоков на устойчивость неадиабатических пленок жидкого металла в магнитном поле.

5. Исследовано влияние термокапиллярных эффектов на устойчивость жидкометаллической струи с током. Показано, что для жидкого металла зависимость поверхностного натяжения от температуры незначительна.

Основные результаты работы докладывались на трех всесоюзных и одной международной конференциях и опубликованы в 14 печатных работах; по материалам работы сделано три изобретения.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста с рисунками, заключения и списка литературы. Общий объем работы 110 страниц машинописного текста.

Во введении кратко описаны некоторые защитные устройства термоядерных реакторов с использованием пленочных и струйных МГД-течений; обоснована актуальность исследования пленочных и струйных МГД-течений. Показана общность явления при исследовании струйных и пленочных течений, обуславливающая общность уравнений и методов их решения. Сформулирована цель диссертационной работы и основные положения выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена изучению некоторых особенностей пленочных МГД течений жидкого металла. В разделе 1.1 приведены основные уравнения и граничные условия,

применяемые при исследовании течения и устойчивости жидкометаллических пленок. В разделе 1.2 исследовано влияние МГД эффектов на длину участка установления однородного течения пленки. Получено уравнение, описывающее форму свободной поверхности пленки проводящей жидкости в гидравлическом приближении. Показано, что установление установившегося ламинарного течения пленки происходит на расстоянии нескольких десятков толщин установившегося течения. В разделе 1.3 получено уравнение, описывающее форму свободной поверхности пленки проводящей жидкости в неоднородном магнитном поле в гидравлическом приближении. В качестве примера приведена форма свободной поверхности в периодически меняющемся магнитном поле и в постоянном поле с периодической малой добавкой. В разделе 1.4 рассмотрено влияние контакта с плазмой на устойчивость пленки проводящей жидкости, стекающей по наклонной плоскости в однородном магнитном поле. Учтено влияние нормального к свободной поверхности жидкого металла электрического поля, возникающего в дебаевском слое, а также влияние давления ионов. Получен инкремент развития неустойчивости. Показано, что контакт с плазмой стабилизирует ламинарное течение пленки. В разделе 1.5 исследуется устойчивость неподвижной пленки проводящей жидкости в магнитном поле при контакте с плазмой в аналогичной постановке. Получен инкремент развития неустойчивости. Показано, что контакт с плазмой стабилизирует поверхность слоя жидкости. В разделе 1.6 исследуется устойчивость неизотермической неподвижной пленки проводящей жидкости, в однородном магнитном поле. Учтено влияние на устойчивость термотоков, возникающих в реакторной камере

вследствие неоднородности температуры и контакта разнородных металлов (термо э.д.с.). Получен инкремент развития неустойчивости.

Вторая глава диссертации посвящена изучению некоторых особенностей МГД течений плоских струй жидкого металла. В разделе 2.1. исследовалось магнитное поле blanket-магнита импульсного термоядерного реактора на РЭП - системы жидкометаллических струй - с токами сложной формы сечения. Построен алгоритм численного расчета магнитного поля blanket-магнита для струй произвольного сечения. Для дальнейших оценок получено аналитическое выражение для нахождения магнитного поля в случае, когда границы сечения струи совпадают с координатными линиями в цилиндрической системе координат. В разделе 2.2. исследуется динамика разрушения системы струй. Вследствие взаимодействия токов, протекающих в струях, с магнитным полем струи "разлетаются", деформируются и радиус blanket-магнита увеличивается. Определено "время жизни" blanket-магнита - время, в течение которого blanket-магнит сохраняет работоспособность. В разделе 2.3 при помощи модельной системы периодически расположенных плоских струй с чередующимися по направлению токами исследуются МГД-неустойчивости blanket-магнита. Получен инкремент перетяжной МГД неустойчивости системы плоских жидкометаллических струй с токами. В этом же разделе на основе модельной периодической системы бесконечно широких струй с чередующимися по направлению токами исследуется Рэлея-Тейлоровская неустойчивость, приводящая к разбиению широкой

струи на отдельные струйки кругового сечения. Получен инкремент неустойчивости.

В третьей главе диссертации рассматриваются МГД неустойчивости жидкометаллических струй круглого сечения с учетом некоторых особенностей физических свойств электропроводной жидкости. В разделе 3.1 инкремент неустойчивости струи получен для проводящей магнитной жидкости с током, т.е. учтена зависимость инкремента от магнитных свойств струи. Показано, что струя магнитной жидкости более устойчива, чем аналогичная жидкометаллическая струя. В разделе 3.2 инкремент неустойчивости струи получен с учетом зависимости поверхностного натяжения от температуры. Показано, что для жидкометаллической струи учет зависимости поверхностного натяжения от температуры не играет существенной роли.

В заключении кратко сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы, намечены основные пути развития исследований.

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 печатных работах, включая три изобретения.

1. Поклонский Е.В., Элькин А.И. Об устойчивости системы токонесящих струй с чередующимися по направлению токами. - Магнитная гидродинамика, 1982, № 4, с.39-45.

2. Бернштам В.А., Поклонский Е.В., Элькин А.И. Устойчивость токонесящей струи проводящей магнитной жидкости. - Магнитная

гидродинамика, 1984, № 3, с.11-14.

3. Баранов Г.Д., Бернштам В.А., Каган Д.Н., Козырев С.В., Минеев Г.В., Морозова В.И., Поклонский Е.В., Элькин А.И. Условия стабильности течения пленки электропроводной жидкости в магнитном поле и анализ деформации системы токонесущих струй. В кн.: Одиннадцатое Рижское совещание по магнитной гидродинамике. т.1. Общие и теоретические вопросы МГД. Тезисы докладов, Саласпилс, 1984.

4. Баранов Г.Д., Бернштам В.А., Минеев Г.В., Морозова В.И., Новиков Н.И., Поклонский Е.В., Элькин А.И. Нестационарные гидродинамические процессы в токонесущих струях и жидкометаллическом контуре blankets-магнита импульсного термоядерного реактора.- Доклады 3^{ей} Всесоюзной конференции по инженерным проблемам управляемого термоядерного синтеза, т.4, Ленинград, 1984.

5. Бернштам В.А., Поклонский Е.В., Элькин А.И. Влияние термотоков на устойчивость пленки жидкого металла, находящегося на проводящей подложке во внешнем магнитном поле.- Магнитная гидродинамика, 1986, № 4, с.139-141.

6. Баранов Г.Д., Бернштам В.А., Минеев Г.В., Поклонский Е.В., Элькин А.И. Исследование устойчивости системы жидкометаллических струй с токами.- Магнитная гидродинамика, 1986, № 4, с.96-101.

7. Бернштам В.А., Поклонский Е.В., Элькин А.И. Оценка длины переходного участка жидкометаллической пленки, стекающей по наклонной плоскости в магнитном поле.- Магнитная гидродинамика, 1987, № 4, с.124-126.

8. Бернштам В.А., Поклонский Е.В., Сизоненко В.Л. Об

устойчивости поверхности жидкометаллического лимитера в горячей плазме.- Магнитная гидродинамика, 1987, № 4, с.37-40.

9. Поклонский Е.В. О форме свободной поверхности жидкометаллической пленки, стекающей по наклонной плоскости в неоднородном магнитном поле.- Магнитная гидродинамика, 1988, № 4, с.131-133.

10. Берендеев С.Н., Бернштам В.А., Каган Д.Н., Поклонский Е.В., Шпильрайн Э.Э. Оценка влияния термотоков на течение пленки жидкого металла по первой стенке реактора при магнитной стабилизации. Тезисы докладов 4^{ей} Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Ленинград, 1988.

11. Бернштам В.А., Панченко И.П., Поклонский Е.В. Исследование влияния контакта с плазмой на устойчивость капиллярных волн на поверхности проводящей жидкости в магнитном поле.- Магнитная гидродинамика, 1990, № 3, с.121-123.

12 Берендеев С.А., Бернштам В.А., Каган Д.Н., Козырев С.В., Поклонский Е.В. Жидкометаллическая пленочная защита первой стенки реакторной камеры импульсного термоядерного реактора с магнитной стабилизацией. Жидкие металлы в термоядерной энергетике. Труды ЦКТИ, № 284, 1990.

13. Берендеев С.А., Бернштам В.А., Каган Д.Н., Козырев С.В., Поклонский Е.В. Концепция стабилизации магнитным полем жидкометаллической пленки защиты первой стенки импульсного термоядерного реактора. Препринт ИВТАН N7-336, М.: 1992. 28с.

14. Bernshtam V.A., Gekht G.M., Kozirev S.V., Poklonsky E.V., Kagan D.N., Krechetova G.A. Grindberg G.L. Laser thermonuclear reactor chamber with magnetic stabilization of liquid metal defence film.- In the book "MHD Processes to

Protection of Environment", Ukraine 1992, Part 2, p.217-218.

15. Бернштам В.А., Дворчик С.Е., Поклонский Е.В., Элькин А.И.
Струйное токосъемное устройство. А.с. N 1168034.

16. Бернштам В.А., Дворчик С.Е., Поклонский Е.В., Элькин А.И.
Способ вывода частиц и энергии из диверторной камеры. А.с. N
1279418.

17. Баранов Г.Д., Бернштам В.А., Дворчик С.Е., Дронник Л.М.,
Минеев Г.В., Новиков Н.И., Поклонский Е.В., Элькин А.И. Камера
импульсного термоядерного реактора. А.с. N 1345915.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Підп. до друку **110393** Формат 60×84^{1/8}. Папір. друк. Друк офсетний.
Умовн.-друк. арк. **1,0** Умовн. фарбо-відб. **1,16** Облік.-вид. арк. **1,0**
Тираж **100** прим. Зам. № **1011**. Безплатно.

Харківське орендне поліграфічне підприємство.
310093, Харків, вул. Свєрдлова, 115.

465243

AB 27.180