
На правах рукописи

Векшина Елена Оскаровна

Моделирование пристеночной плазмы токамака
Глобус-М

01.04.08 – физика плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого"

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор
В. А. Рожанский
ФГАОУ ВО СПбПУ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
Л. Г. Аскинази
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

кандидат физико-математических наук,
А. С. Кукушкин
НИЦ "Курчатовский институт"

Ведущая организация – Санкт-Петербургский государственный университет.

Защита состоится „23“ декабря 2021 года в „14.00“ на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, e-mail: post@mail.ioffe.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте www.ioffe.ru

Автореферат разослан „_____“ _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

А.В.Белашов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Методы нагрева плазмы до температуры, при которой может пойти термоядерная реакция с положительным выходом энергии, способы удержания плазмы при этой температуре активно изучаются мировым учёным сообществом, поскольку они позволяют создать источник электроэнергии без объёмных выбросов парниковых газов и без создания долгоживущих радиоактивных изотопов. Реализация электростанции на управляемом термоядерном синтезе требует создания установки бóльшего размера, чем размер имеющихся на сегодняшний день (Критерий Лоусона требует большого времени удержания энергии плазмы для создания электростанции на термоядерном синтезе [1]. Возможный способ увеличения времени удержания энергии – увеличение размера установки.) Одним из ключевых вопросов при создании больших установок является снижение энергетических нагрузок на стенки камеры. Пристеночная область может иметь либо лимитерную либо диверторную конфигурацию магнитных поверхностей. Проектируемые токамаки-реакторы будут работать в диверторной конфигурации, то есть область удержания не будет иметь общих точек с материальной стенкой, а будет ограничена сепаратрисой. Нагрузки на стенки камеры в диверторной конфигурации ниже, чем в лимитерной. В диверторной конфигурации потоки энергии и частиц, покидая область удержания, пересекают сепаратрису в перпендикулярном магнитному полю радиальном направлении и попадают в область, где силовые линии выходят на материальные поверхности, область SOL (Scrape-Off Layer). В SOL потоки частиц и энергии из радиальных становятся продольными и выходят на диверторные пластины вдоль силовых линий магнитного поля. Продольный перенос в плазме эффективней, чем поперечный, поэтому потоки частиц и энергии, выходящие на диверторные пластины могут быть настолько большими, что превысят инженерные ограничения для поверхности камеры. Физические процессы, происходящие в SOL, влияют на величину потоков на пластины. Анализ этих процессов на основе моделирования является актуальной задачей исследований на токамаках.

Максимальные нагрузки приходятся на узкую область диверторных пластин вблизи точки пересечения их с сепаратрисой (Strike Point) и величина нагрузок зависит от ширины этой области. Эта область меньше полной ширины слоя пристеночной плазмы, находящегося между сепаратрисой и материальной стенкой. В литературе под шириной SOL (Scrape-Off Layer) понимают ширину части области за сепаратрисой, на пересечение которой с диверторной

пластиной приходится основные энергетические нагрузки. Экспериментально ширину SOL часто определяют по профилю потока энергии на диверторную пластину [2]. В этом случае ширину пика плотности потока энергии отображают вдоль магнитных поверхностей в экваториальную плоскость и полученную величину называют шириной SOL, λ_q . Кроме этого определения, определяют также ширину SOL по профилю плотности λ_n , по профилю электронной температуры λ_{Te} [3]. Во всех случаях ширина SOL характеризует масштаб спада параметров плазмы от значений вблизи сепаратрисы.

Для оценки нагрузок на пластины в проектируемых установках создаются скейлинги, описывающие зависимость ширины SOL от параметров разряда. Достоверность скейлингов проверяется в экспериментах на установках, работающих на данный момент в разных странах. Скейлинг, опубликованный в 2013 году [4], обобщил наблюдения на многих токамаках, работающих с током плазмы в диапазоне от 0.4МА(MAST) до 3.5МА(JET). В базу данных, по которой создавался этот скейлинг, вошли результаты экспериментов на двух сферических токамаках, MAST и NSTX, с током плазмы 0.4–1.2МА. Значение тока плазмы токамака Глобус-М может меняться в диапазоне 0.1–0.25МА. В этом диапазоне справедливость скейлинга никто не проверял, поэтому анализ зависимости ширины SOL от тока в экспериментах на Глобус-М представляет научный интерес.

Ширина обдирочного слоя определяется соотношением поперечного и продольного переноса за сепаратрисой. До недавнего времени считалось, что основным механизмом поперечного переноса в обдирочном слое является турбулентный перенос (раздел 1.4 книги [3]). В режиме улучшенного удержания, который рассматривается как основной режим работы токамака-реактора, турбулентный (аномальный) перенос в области транспортного барьера вблизи сепаратрисы подавлен. В работе Голдстона [5] описана модель, в которой основным механизмом поперечного переноса снаружи от сепаратрисы являются дрейфы. Ширина SOL, определяемая этим механизмом, имеет обратную зависимость от тока плазмы, что согласуется со скейлингом в статье [4]. Однако в работе [5] были сделаны эвристические оценки, внутренне противоречивые по признанию самого автора, поскольку не были учтены эффекты того же порядка величины, что и учтённые: дрейф в скрещенных электрическом и магнитном поле, вязкость. Самосогласованная неоклассическая модель формирования обдирочного слоя была предложена В.А.Рожанским и Е.Г.Кавеевой [6]. Ключевым моментом этой модели было протекание радиального тока за сепаратрисой и замыкание этого радиального тока продоль-

ными токами на пластины дивертора. Для проверки этой модели необходимо моделирование с выключенными (пониженными) коэффициентами аномального переноса. Попытки такой проверки были представлены в работах [7] и [8] на примере моделирования разряда DIII-D, но численные сложности не позволили понизить коэффициенты аномального переноса до требуемого уровня. Ширина обдирочного слоя в токамаке Глобус-М порядка 1 сантиметра, что больше, чем на многих токамаках из-за небольшой величины тока по плазме. Большая ширина SOL облегчает задачу численного моделирования со сниженными коэффициентами аномального переноса, и такое моделирование было проведено при подготовке данной диссертации.

Экспериментальные установки работают в разных диверторных конфигурациях - с одной X-точкой, с двумя, Super-X divertor, "снежинка" и др. При выборе конфигурации для будущего токамака-реактора сравнивают энергетические нагрузки в разных случаях, а также стоимость и сложность реализации. Для международной установки ИТЭР выбрана конфигурация с одной X-точкой. Такая конфигурация изучена на многих установках (JET, ASDEX Upgrade и др.). В рамках проекта DEMO диверторная конфигурация ещё не выбрана и сравнительный анализ энергетических нагрузок для разных магнитных конфигураций - актуальная задача.

Протекание токов в пристеночной области токамаков оказывает влияние на энергетические нагрузки на диверторные пластины. Поэтому распределение токов экспериментально изучается на различных токамаках, таких как ASDEX-Upgrade [9], Compass [10], TCV [11]. В указанных экспериментах измерены токи на диверторные пластины. Токи в объёме пристеночной плазмы в эксперименте не измерены. Для проверки модели распределения токов в пристеночной плазме, описанной в [6], необходимо моделирование. В работе [11] было проведено моделирование и сравнение с экспериментом распределения токов в пристеночной плазме токамака TCV для магнитной конфигурации LSN и двух направлений тороидального магнитного поля. Моделирование с хорошей точностью воспроизводило экспериментальные измерения. В задачи работы не входило вычисление радиального тока в SOL, распределения тока в других магнитных конфигурациях.

Таким образом, до начала исследования оставались неясными:

- способно ли моделирование кодом SOLPS-ITER воспроизвести экспериментальные данные, полученные в разрядах с улучшенным удержанием токамака Глобус-М с различными значениями тока плазмы в диапазоне

100 – 200kA

- роль неоклассических (дрейфовых) механизмов в формировании обдирочного слоя в режиме улучшенного удержания
- влияние конфигурации сепаратрисы на ширину обдирочного слоя в токамаке Глобус-М
- структура токов в пристеночной области токамака

Цели работы

- Моделирования двумерным транспортным кодом SOLPS-ITER стационарной стадии разрядов токамака Глобус-М
- Анализ на основе моделирования физических процессов, происходящих в пристеночной плазме, в разрядах с улучшенным удержанием в области замкнутых силовых линий токамака Глобус-М
- Изучение зависимости ширины обдирочного слоя от тока плазмы и геометрии разряда. Анализ роли неоклассического (дрейфового) механизма в формировании обдирочного слоя
- Выяснение с помощью моделирования механизмов возникновения токов, вытекающих на пластины дивертора

Новизна работы

Впервые на основе моделирования нескольких разрядов показана обратная зависимость ширины обдирочного слоя от тока плазмы на токамаке Глобус-М. Впервые анализ результатов двумерного моделирования позволил сравнить ширину SOL для разрядов с разной геометрией - CDN (Connected Double Null, магнитная конфигурация разряда содержит одну сепаратрису и две X-точки на ней) и DDN (Disconnected Double Null, магнитная конфигурация разряда содержит две сепаратрисы), и показал, что ширина SOL слабо зависит от геометрии разряда, а уменьшение плотности потока энергии на пластину в случае CDN составляет порядка 36%. На основе моделирования показано, что неоклассический перенос играет заметную роль в формировании обдирочного слоя при доминирующей роли турбулентного переноса. Впервые на основе моделирования подтверждено существование радиального тока в

обдирочном слое, предсказанное теоретически. Впервые предсказан тип токов (Plates Closing Currents - PCC), замыкающих поперечные токи в объёме плазмы через диверторные пластины. Продемонстрировано, что вытекающие на пластины дивертора токи, вычисленные при моделировании, близки к токам, измеряемым диверторными зондами токамака Глобус-М. Продемонстрировано, что дрейфовый механизм протекания токов, описанный в коде SOLPS-ITER, приводит к возникновению токов на диверторные пластины, значения которых близки к измеренным экспериментально, что подтверждает адекватность физической модели, заложенной в код.

Достоверность научных результатов

Достоверность научных результатов диссертации основана на использовании кода SOLPS-ITER, применяемого на многих токамаках, и подтверждена результатами экспериментальных измерений на токамаке Глобус-М. Результаты моделирования кодом B2SOLPS (впоследствии вошедшим в SOLPS-ITER) хорошо согласуются с экспериментальными данными [12], а также с результатами моделирования другими численными кодами для расчёта параметров плазмы в пристеночной области токамаков [13]. Моделирование пристеночной плазмы токамака Глобус-М подтверждается результатами измерений, выполненных подвижным зондом Ленгмюра, расположенным в экваториальной плоскости, и диверторными зондами.

Обнаруженная обратная зависимость ширины обдирочного слоя от тока плазмы подтверждает скейлинг ([4]), полученный при анализе экспериментальных данных многих токамаков.

Одновременно с исследованиями токов через диверторные пластины Глобуса-М, проводилось исследование токов, протекающих через диверторные пластины токамака ASDEX-Upgrade. На обоих токамаках схемы замыкания токов оказались похожими [14].

Практическая значимость работы

1. Зависимость ширины обдирочного слоя, полученная в результате моделирования, от тока по плазме для малых токов на примере токамака Глобус-М является дополнением к существующим сейлингам
2. Рассчитаны энергетические нагрузки на диверторные пластины в стационарной стадии разряда токамака Глобус-М и выяснена зависимость этих нагрузок от геометрии разряда. В результате моделирования показано, что выигрыш при использовании конфигурации с верхним и нижним диверторами является меньшим, чем предполагалось

3. Предсказано, что токи, протекающие в объёме пристеночной плазмы, замыкаются токами на диверторные пластины, что влияет на тепловую нагрузку на пластины

Положения, выносимые на защиту

1. Моделирование разрядов токамака Глобус-М в режимах улучшенного удержания с различными значениями тока по плазме в различных диверторных конфигурациях согласованное с результатами экспериментальных измерений. Подбор коэффициентов аномального поперечного переноса, коэффициента распыления углерода
2. Анализ на основе моделирования зависимости ширины обдирочного слоя от тока плазмы в разрядах с улучшенным удержанием токамака Глобус-М
3. Оценка ширины обдирочного слоя, сформированного неоклассическими (дрейфовыми) процессами, на основе численного эксперимента – моделирования с подавленным снаружи от сепаратрисы аномальным переносом
4. Анализ на основе результатов двумерного моделирования пристеночной плазмы зависимости ширины обдирочного слоя и пикового значения плотности потока энергии на диверторную пластину от магнитной конфигурации для случаев конфигураций с двумя сепаратрисами и одной сепаратрисы с двумя X-точками
5. Подтверждение численными расчётами модели протекания радиального тока в обдирочном слое и его замыкания парой токов, вытекающих на пластины дивертора
6. Результаты моделирования тепловых потоков и токов соответствуют результатам зондовых измерений на пластинах дивертора

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период с 2013 по 2020 год и описаны в статьях, опубликованных в научных журналах Plasma Physics and Controlled Fusion, Nuclear Materials and Energy, Nuclear Fusion. Всего публикаций - 9.

По результатам работы были сделаны доклады:

1. устный на 45 EPS Conference on Plasma Physics (2018) V. Rozhansky, E. Kaveeva, I. Senichenkov, E. Vekshina "Role of neoclassical mechanisms in the formation of a tokamak scrape-off layer"
2. устный на международной конференции Nature conference "Advances and

Applications in Plasma Physics” (AAPP2019)

3. стендовый на международной конференции PSI-24, 2021, V.Rozhansky, E.Kaveeva, I.Senichenkov, D.Sorokina, E.Vekshina, D.Coster, P.McCarthy, N.Khromov ”Currents structure in the scrape-off layer of a tokamak”
4. на XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (2021) В.К.Гусев и др. ”Глобус-M2: первые результаты работ и планы научных исследований”
5. на 28 IAEA FEC конференции (2021) Yury Petrov et. al. ”Overview of Globus-M2 spherical tokamak results at the enhanced values of magnetic field and plasma current”

Результаты докладывались на семинарах кафедры физики плазмы Политехнического Университета и лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. В диссертации 91 страница печатного текста, в том числе 70 рисунков, 5 таблиц, и список литературы, включающий 39 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации описаны некоторые вопросы современных исследований пристеночной плазмы токамаков, приведён обзор литературы по теме данной работы. Описан код SOLPS-ITER, который использовался для моделирования пристеночной плазмы сферического токамака Глобус-М. Рассказано про использование кода SOLPS-ITER для моделирования пристеночной плазмы сферических токамаков NSTX и MAST. Обоснована актуальность работы, сформулированы цели, продемонстрирована новизна работы и приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена моделированию стационарной стадии разрядов токамака Глобус-М в геометрии DDN (Disconnected Double Null) в режиме улучшенного удержания. Разряды отличались током по плазме, мощностью, центральными значениями электронной температуры и плотности. Целью работы было моделирование типичных разрядов токамака Глобус-М и выяснение зависимости ширины SOL (Scrape Off Layer) от параметров плазмы, в частности от величины тока по плазме. Основные результаты опубликованы в [15].

Для анализа были выбраны пять разрядов. Основные параметры разрядов приведены в таблице 1. В первом столбце - номер разряда, во втором

Таблица 1: Основные параметры пяти разрядов

номер	тип нагрева	I_{pl} , kA	T_e^{center} , eV	n_e^{center} , $10^{19}m^{-3}$	Power, kW	dR_{sep}^{mid} , cm	flux expansion factor
34439	ОН	114	490	3.7	178	0.40	3.49
32171	ОН	125	445	6.0	257	0.50	3.83
34358	ОН+NBI	142	461	5.8	415	0.66	5.82
30095	ОН	166	655	3.6	234	0.99	3.65
34410	ОН	198	770	3.2	390	0.65	7.3

столбце указан тип нагрева - либо только омический нагрев (ohmic heating - ОН), либо дополнительный нагрев нейтральным пучком (neutral beam injection - NBI). Далее указаны значение тока по плазме (I_{pl}), центральное значение электронной температуры (T_e^{center}) и концентрации (n_e^{center}), мощность разряда (Power, kW). В седьмом столбце указано расстояние между внутренней и внешней сепаратрисами на внешнем обводе (dR_{sep}^{mid}). В последнем - коэффициент расширения магнитного потока (flux expansion factor) - отношение расстояния между магнитными поверхностями у нижней наружной диверторной пластины и в экваториальной плоскости. Значения двух последних параметров определяются по магнитной конфигурации, реконструированной кодом EFIT [16].

Моделирование выполнялось гидродинамической версией кода, то есть и нейтральные частицы и заряженные описывались гидродинамическими уравнениями. В коде SOLPS-ITER предусмотрено ограничение потоков, которое позволяет использовать гидродинамическое приближение даже в тех ситуациях, когда длина свободного пробега частиц сравнима с характерным масштабом изменения параметров плазмы. Расчётная сетка строилась на карте магнитного потока, определённой кодом EFIT.

При моделировании учитывалось наличие примеси углерода в плазме, поскольку камера токамака Глобус-М покрыта углеродными пластинами и распыление углерода приводит к наличию примеси в плазме. Величина эффективного заряда в области удержания была от 1.4 до 2 для всех разрядов.

Для определения граничных условий моделирования использовались экспериментальные данные. Для всех разрядов были заданы профили электронной температуры и плотности в центральной части разряда, определённые по томсоновскому рассеянию лазерного излучения. Так же для всех разрядов

профили параметров плазмы были измерены диверторными зондами, расположенными на нижней наружной диверторной пластине. Для некоторых разрядов присутствовали результаты измерений боковым ленгмюровским зондом в экваториальной плоскости.

По результатам моделирования были вычислены основные каналы потерь энергии - радиационные потери и поток энергии на пластины дивертора. Распределение потока энергии между различными каналами показано на рисунке 1. На левом верхнем графике показана мощность всех пяти разрядов, а также основные каналы потерь энергии разряда – поток энергии на нижнюю наружную диверторную пластину и поток энергии, уходящий в виде излучения. Самая большая мощность достигнута в разряде с дополнительным нагревом NBI. На этом же рисунке 1 круговые диаграммы показывают долю потерь энергии на излучение и долю потока энергии на нижнюю наружную диверторную пластину. Видно, что в разряде 34439 с током плазмы 114 kA самая маленькая доля энергии приходится на нижнюю наружную диверторную пластину. А в разряде 34410 с током плазмы 198 kA , наоборот, доля энергии, приходящейся на нижнюю наружную диверторную пластину, самая большая. Это объясняется тем, что расстояние между сепаратрисами в разряде 34439 самое маленькое - 0.4 cm (см. таблицу 1) и этот разряд ближе всех к магнитной конфигурации CDN, у которого две X-точки расположены на одной сепаратрисе и потоки энергии на верхнюю и нижнюю наружные пластины становятся почти одинаковыми (см. главу данной работы о сравнении CDN и DDN конфигураций). В разряде 34410 расстояние между сепаратрисами больше и составляет 0.65 cm (см. таблицу 1). На самом деле играет роль не само расстояние, а его отношение к ширине SOL в данном разряде. Зависимость ширины SOL от параметров разряда проанализирована в конце **главы 1** диссертации. Разряд 34410 ближе к магнитной конфигурации LSN (Lower Single Null), содержащей только одну сепаратрису. В такой конфигурации верхних пластин нет. В большинстве случаев наружная пластина получает большую часть потока энергии.

Ширина SOL определялась по экспоненциальной аппроксимации электронной температуры в ближнем SOL. Алгоритм определения ширины SOL такой же, как и в работе [17]: профиль электронной температуры за сепаратрисой в экваториальной плоскости со стороны слабого поля (Low Field Side, LFS) аппроксимировался функцией $T_e = \alpha \cdot \exp(-R/\lambda_{Te})$ (на рисунке 2, по вертикальной оси выбран логарифмический масштаб, поэтому аппроксимирующие функции - прямые). Как известно из экспериментальных исследо-

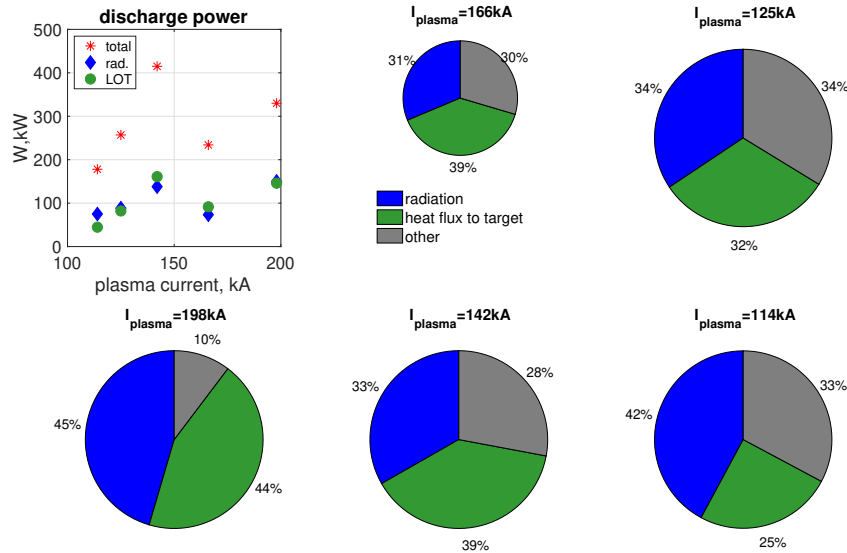


Рис. 1: Мощность пяти разрядов, поток энергии на нижнюю наружную диверторную пластину (Lower Outer Target) и поток энергии, уходящий с излучением (Radiation). Пять круговых диаграмм, показывающих долю основных каналов потерь энергии в мощности каждого разряда.

ваний, например [18], профиль электронной температуры аппроксимируется экспоненциальной зависимостью только в ближнем SOL. В дальнем SOL профиль становится более пологим. Параметр экспоненты λ_{Te} назван шириной SOL данного разряда.

Ширина SOL для разных значений тока плазмы показана на рисунке 3 кружками. Сплошной линией показана аппроксимация ширины SOL кривой $\lambda = \alpha \cdot (I_{plasma})^\beta$, где λ в *cm*, I_{plasma} в *kA*. Параметры аппроксимирующей функции: $\alpha = 3.25 \times 10^2$, $\beta = -1.2$.

Обратная зависимость ширины SOL от тока плазмы согласуется с экспериментальными результатами на многих токамаках [4], полученными при значительно больших токах плазмы (минимальный ток из базы данных [4] - 0.4 MA на токамаке MAST, максимальный - 3.5 MA на JET). Зависимость ширины SOL от параметров плазмы при низких токах по плазме, типичных для токамака Глобус-М, исследована впервые.

Во **второй главе** диссертации проанализирована неоклассическая ширина обдирочного слоя токамака. Задачей, решённой в данной главе, была проверка модели неоклассического SOL при подавлении аномального переноса. В этой главе приводятся результаты моделирования с уменьшенными коэффициентами аномальной диффузии и аномальной электронной температуропроводности. Показано, что ширина SOL остается конечной, несмотря

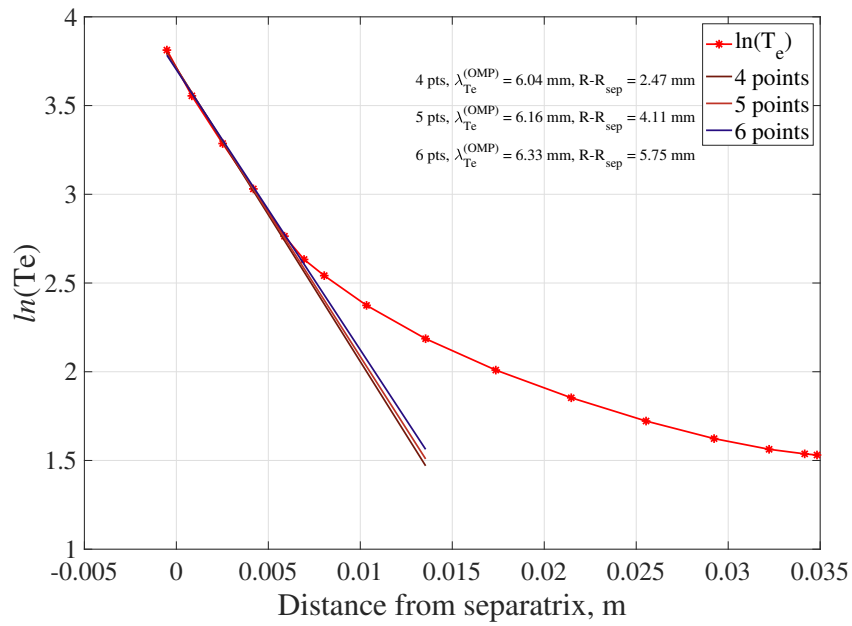


Рис. 2: Аппроксимация экваториального профиля электронной температуры экспоненциальной функцией. Разряд 34410. По вертикальной оси - логарифмический масштаб. В качестве ширины SOL данного разряда был выбран параметр аппроксимирующей функции, определённой по пяти точкам профиля температуры в SOL - 6.16mm .

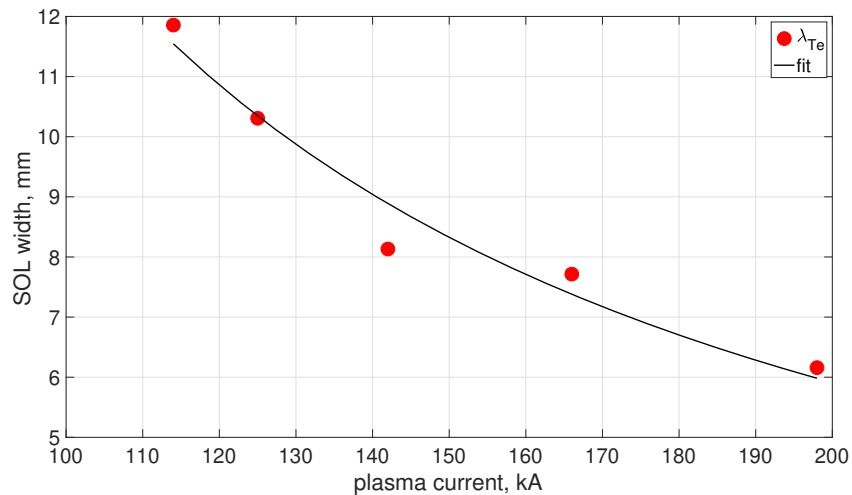


Рис. 3: Зависимость ширины SOL от тока плазмы для пяти разрядов. Сплошной линией показана аппроксимация ширины SOL кривой $\lambda_{Te}[cm] = 3.25 \times 10^2 / (I_{plasma}[kA])^{1.2}$.

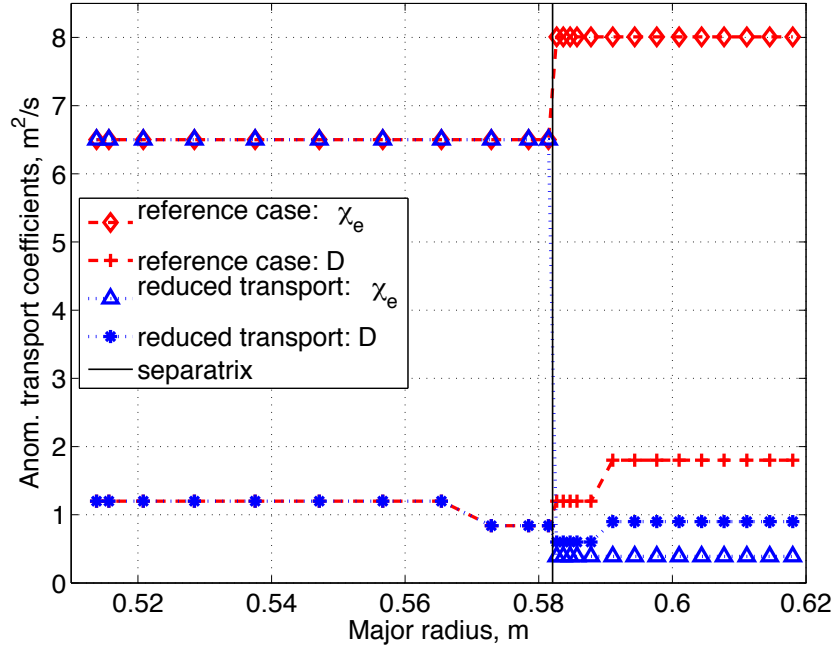


Рис. 4: Коэффициенты электронной температуропроводности и диффузии для базового случая и случая с подавленным аномальным переносом.

на подавление аномального механизма переноса, и имеет тот же порядок, что и ширина SOL в моделировании разряда Глобус-М. Следовательно, неоклассический перенос вносит заметный вклад в формирование SOL. Основные результаты опубликованы в [6].

Для моделирования был выбран разряд 34439 с низким значением тока по плазме $I_{pl} = 114kA$ и, следовательно, большой шириной SOL. В магнитной конфигурации данного разряда присутствовали две сепаратрисы, расстояние между ними на наружном обходе - $0.4cm$ (см. таблицу 1). Подавление аномального переноса моделировалось уменьшением коэффициентов аномальной электронной теплопроводности и аномальной диффузии снаружи от сепаратрисы. На рисунке 4 показаны профили базовых и сниженных значений коэффициентов переноса в экваториальной плоскости со стороны LFS.

Ширина спада электронной температуры, определённая по результатам моделирования с подавленным аномальным переносом, равна $3.5mm$, в базовом моделировании разряда она составляла $12.5mm$. Масштаб спада электронной температуры, определённый по профилю, полученному при моделировании с подавленным аномальным переносом, порядка величины, предсказанной в аналитической модели - $4mm$. Масштаб спада плотности в SOL почти не изменился в случае моделирования с пониженными коэффициента-

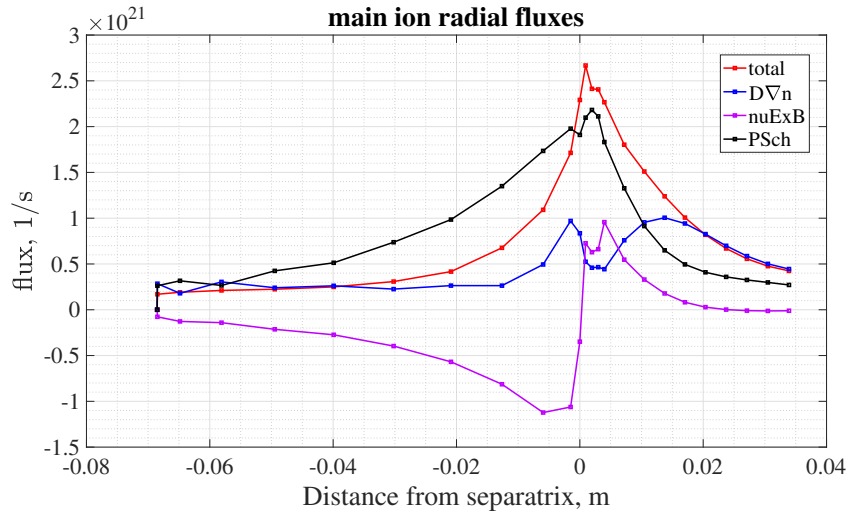


Рис. 5: Полный радиальный поток основных ионов и три его составляющие для случая моделирования с пониженными коэффициентами переноса.

ми переноса по сравнению с базовым случаем. В обоих случаях он порядка $2.5ct$, то есть больше, чем масштаб спада температуры, что также согласуется с аналитической моделью.

По результатам моделирования вычислен радиальный ток в SOL. Показано, что значение радиального тока при подавленном аномальном переносе превышает значение радиального тока в SOL в базовом моделировании. В обоих случаях основной вклад в радиальный ток даёт диамагнитный ток. В разделе [2.4](#) диссертации показано, что радиальный ток вызван радиальным неамбиполярным диамагнитным потоком ионов. Радиальный поток ионов возникает из-за ионизации в объёме плазмы нейтралей, летящих с обращённой к плазме поверхности камеры в процессе рециклинга. В базовом моделировании основное слагаемое в радиальном потоке ионов в SOL диффузионное с аномальным коэффициентом диффузии, оно амбиполярно. При подавлении аномального переноса в SOL основное слагаемое в радиальном потоке ионов из области удержания - диамагнитный поток, который неамбиполярен и вызывает радиальный ток. На рисунке 5 показаны составляющие радиального потока основных ионов в случае моделирования с пониженными коэффициентами аномального переноса. Видно, что в ближнем SOL основной вклад даёт диамагнитный поток. При решении уравнения непрерывности из диамагнитного потока вычитается постоянная составляющая, имеющая нулевую дивергенцию (диамагнитный ток, из которого также вычтена постоянная составляющая, имеющая нулевую дивергенцию, назван *PSch* на рисунке).

Результаты моделирования подтвердили значение ширины SOL, полученное в аналитической модели [6]. Поскольку в моделировании вычисление неоклассических потоков проводится аккуратнее, чем в аналитической модели, можно утверждать, что моделирование подтвердило, что неоклассический механизм обеспечивает формирование SOL конечной ширины.

В **главе 3** приведено сравнение двух разрядов токамака Глобус-М, отличающихся магнитной конфигурацией, и проанализированы потоки энергии на пластины в этих двух случаях; проанализированы токи, вытекающие на пластины, в обоих случаях. Показано, что при определении плотности потока энергии на пластины необходимо учитывать токи, протекающие в пристеночной области.

Для сравнения были выбраны два разряда с различными конфигурациями: CDN и DDN, и схожими остальными параметрами разряда: ток по плазме, мощность, профиль электронной плотности, профиль электронной температуры. Разряды были промоделированы кодом SOLPS-ITER с одинаковыми аномальными коэффициентами переноса.

Приведённая в начале **главы 3** грубая оценка ширины SOL предсказывает уменьшение этой величины в $\sqrt{2}$ раз в случае конфигурации CDN и одинаковую величину пиков мощности на каждой из двух наружных диверторных пластин в $\sqrt{2}$ раз уменьшенную относительно пика мощности на нижней наружной диверторной пластине в конфигурации DDN.

Распределение мощности разряда, выходящей на диверторные пластины, между четырьмя пластинами для двух конфигураций показано в таблице 2. Действительно, в конфигурации DDN основной поток энергии приходит на нижнюю наружную пластину, в конфигурации CDN потоки энергии на верхнюю и нижнюю пластину близки по величине. Ширина SOL в конфигурации CDN, определённая по результатам моделирования, оказалась меньше ширины SOL в конфигурации DDN, но не в $\sqrt{2}$ раз, а в 1.1 раза. Анализ решения показал, что неверны использованные при простой оценке предположения о малости полоидальной проекции скорости электрического дрейфа по сравнению с полоидальной проекцией скорости звука, а также о малости плотности электрического тока на пластину по сравнению с ионным током насыщения. Эти два фактора оказывают сильное влияние на потоки энергии в пристеночной области и должны быть учтены при вычислении потоков энергии на диверторные пластины токамака Глобус-М.

В **главе 3** проведён анализ токов в пристеночной плазме в конфигурации CDN. Показано, что, кроме известных Пфирш-Шлютеровского тока и

Таблица 2: Мощность, выходящая на пластины дивертора, для двух разрядов

номер разряда	ниж.	ниж.	верх.	верх.
	нар. kW	внут. kW	нар. kW	внут. kW
30095(DDN)	91.4	21.7	22.5	2.3
30422(CDN)	57.4	10	56	8.5

термотока, в пристеночной плазме протекают ещё два вида токов, замыкающих радиальные токи в объёме пристеночной плазмы. В конфигурации CDN значения электронной температуры на разных концах силовых линий отличаются меньше, чем в конфигурации DDN. Поэтому величина термотока в конфигурации CDN меньше и токи, замыкающие радиальные токи в объёме пристеночной плазмы, дают больший чем термотоки, вклад в токи на диверторные пластины.

Глава 4 посвящена анализу токов, протекающих в пристеночной плазме токамака Глобус-М в конфигурации DDN. Анализ проведён на основе результатов моделирования кодом SOLPS-ITER разряда 34410. Результаты измерения токов на диверторные пластины с помощью диверторных зондов подтверждают сделанные выводы ([14]).

Рассмотрены полоидальные и радиальные токи в SOL. Продемонстрировано, что в полоидальный ток основной вклад вносит параллельный ток, который определяется балансом сил электронной компоненты. Кроме параллельного тока, диамагнитный ток также вносит вклад в полоидальный ток, хотя и меньший, чем параллельный.

Показано, что в SOL возникает неоклассический радиальный ток (подробнее о нём рассказывается в **главе 2**). Этот ток требует замыкания полоидальным током. Полоидальный ток в SOL выходит на пластины дивертора и может быть измерен экспериментально. Ток, вытекающий на пластины дивертора, является суммой полоидального тока, замыкающего радиальный, и термотока, текущего вдоль силовых линий магнитного поля от диверторной пластины с большей электронной температуры к диверторной пластине с меньшей электронной температурой.

Ещё один радиальный ток, требующий замыкания полоидальным током, это диамагнитный ток, текущий через ветви сепаратрисы ниже нижней X-точки и выше верхней X-точки. Этот ток вызван вертикальным дрейфом заряженных частиц в неоднородном магнитном поле. В областях, не имеющих

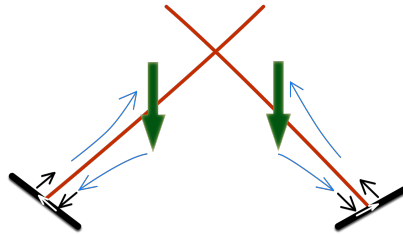


Рис. 6: Схема замыкания токов в нижнем PFR. Вертикальные зелёные стрёлки показывают токи через ветви сепаратрисы, вызванные ∇B дрейфом. Изогнутые голубые стрёлки показывают полоидальные проекции продольных токов, замыкающих вертикальные токи. Чёрные стрёлки вблизи пластин показывают токи через слой объёмного заряда. Белые стрёлки показывают токи внутри пластин.

общей границы с зоной удержания (Private Flux Region, PFR), вертикальный ток не может быть замкнут токами вдоль силовых линий, и замыкается токами через пластины дивертора. Схематически это замыкание показано на рисунке 6.

Распределение полоидальной составляющей плотности тока в области нижнего дивертора показано на рисунке 7 стрёлками. Токи, показанные на схеме 6, видны со стороны слабого магнитного поля. Со стороны сильного поля в области SOL направление тока на пластину определяется термотоком, бóльшим по величине, чем полоидальные токи, замыкающие радиальный ток.

В **заключении** формулируются **основные результаты, полученные в диссертации**:

1. Проведено моделирование пристеночной плазмы для пяти разрядов токамака Глобус-М в режиме улучшенного удержания с разными значениями тока по плазме. На основе результатов моделирования продемонстрирована обратная зависимость ширины обдирочного слоя от тока плазмы в диапазоне от 110 до 200кА.

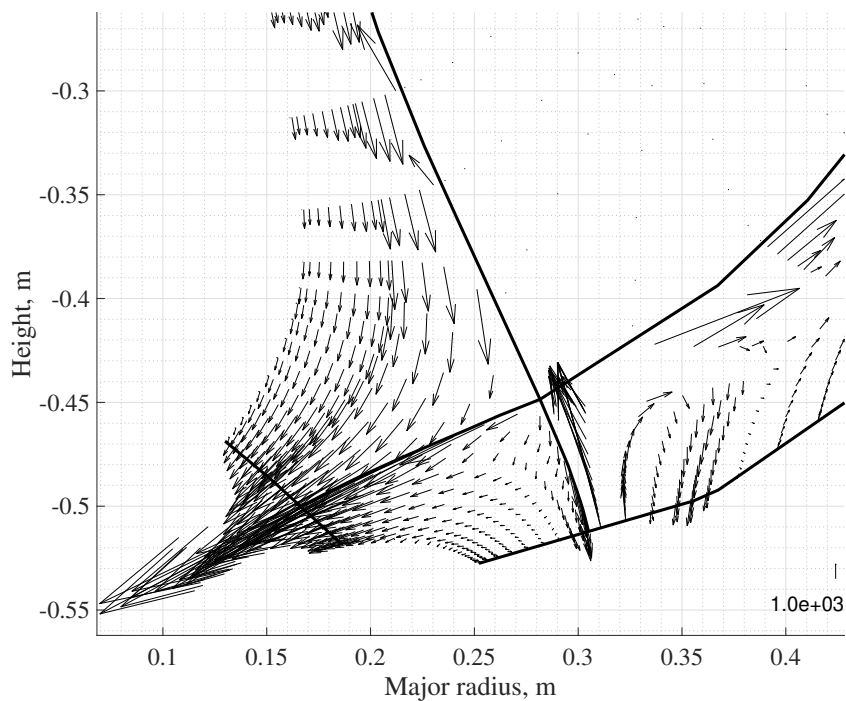


Рис. 7: Плотность тока в нижней диверторной области разряда. Длина стрелки пропорциональна плотности тока. Направление стрелки совпадает с направлением тока в полоидальном сечении. В правом нижнем углу рисунка показана стрелка, соответствующая плотности тока $1kA/m^2$.

2. С помощью численного эксперимента (моделирования с пониженным аномальным переносом) показано, что при подавленном аномальном переносе ширина обдирочного слоя остаётся конечной и обусловлена неоклассическими (дрейфовыми) механизмами.
3. Ширина обдирочного слоя, определённая в результате моделирования, в случае симметричного разряда с двумя X-точками на одной сепаратрисе на 10% меньше ширины обдирочного слоя в разряде с одной X-точкой. Симметричный разряд с двумя X-точками на одной сепаратрисе не снижает в два раза плотность потока энергии на пластины, как это можно было бы предположить из простых соображений. Максимальное значение плотности потока энергии на пластины в этом случае меньше на 36%, чем эта величина в случае разряда в конфигурации с двумя сепаратрисами.
4. Показано, что при оценке потоков энергии и частиц на диверторные пластины токамака Глобус-М, необходимо учитывать протекание токов в пристеночной области и дрейфы заряженных частиц, поскольку они дают заметный вклад в полоидальные потоки частиц и энергии.
5. На основе моделирования продемонстрировано наличие радиального тока в обдирочном слое, имеющего неоклассическую природу, и пары токов, вытекающих на пластины и замыкающих радиальный. Токи на пластины, определённые в моделировании, воспроизводят токи, измеренные диверторными зондами.

В приложении приведены уравнения, которые решаются кодом SOLPS-ITER. Уравнения получены из уравнений моментов Брагинского ([19]) и адаптированы для численного решения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. I.Yu. Senichenkov, E.G. Kaveeva, A.V. Gogoleva, E.O. Vekshina, G.V. Zadvitskiy, P.A. Molchanov, V.A. Rozhansky, S.P. Voskoboynikov, N.A. Khromov, S.A. Lepikhov, V.K. Gusev and The Globus-M Team. Integrated modelling of the Globus-M tokamak plasma and a comparison with SOL width scaling. // Nuclear Fusion 2015 V.55 053012
2. V.K. Gusev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, B.Ya. Ber, E.N. Bondarchuk, V.V. Bulanin, A.S. Bykov, F.V. Chernyshev, E.V. Demina, V.V. Dyachenko, P.R. Goncharov, A.E. Gorodetsky, E.Z. Gusakov, A.D. Iblyaminova, A.A.

- Ivanov, M.A. Irzak, E.G. Kaveeva, S.A. Khitrov, M.V. Khokhlov, N.A. Khromov, V.V. Kolmogorov, V.A. Kornev, S.V. Krasnov, G.S. Kurskiev, A.N. Labusov, S.A. Lepikhov, N.V. Litunovsky, I.V. Mazul, A.D. Melnik, V.V. Mikov, V.B. Minaev, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, E.E. Mukhin, A.N. Novokhatsky, A.D. Ovsyannikov, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, V.A. Rozhansky, N.V. Sakharov, A.N. Saveliev, I.Yu. Senichenkov, V.Yu. Sergeev, P.B. Shchegolev, O.N. Shcherbinin, I.V. Shikhovtsev, V.S. Tanaev, V.N. Tanchuk, S.Yu. Tolstyakov, V.I. Varfolomeev, E.O. Vekshina, A.V. Voronin, S.P. Voskoboinikov, F. Wagner, A.Yu. Yashin, G.V. Zadvitskiy, A.P. Zakharov, R.Kh. Zalavutdinov and E.G. Zhilin. Review of Globus-M spherical tokamak results. // Nuclear Fusion, 2015, V. **55**, 104016
3. E Vekshina, I Senichenkov, V Rozhansky, E Kaveeva, N Khromov, G Kurskiev, M Patrov and Globus-M team. Globus-M plasma edge modelling with B2SOLPS5.2 code. // Plasma Physics Controlled Fusion, 2016, V. **58** 085007
 4. V Rozhansky, E Kaveeva, I Senichenkov and E Vekshina. Structure of the classical scrape-off layer of a tokamak. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2018, V. **60**, 035001
 5. D. S. Sorokina, I. Yu. Senichenkov, V. A. Rozhansky, and E. O. Vekshina. Modeling of Globus-M2 spherical tokamak edge with nitrogen seeding. // Physics of Plasmas, 2018, V. **25**, 122514
 6. E Vekshina, V Rozhansky, E Kaveeva, I Senichenkov and N Khromov. Modeling of Globus-M connected double-null discharge. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2019, V. **61** 125009
 7. Хромов Н.А., Векшина Е.О., Гусев В.К., Литуновский Н.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В. Исследование пристеночной плазмы токамака Глобус-М с помощью массива диверторных ленгмюровских зондов. // Журнал технической физики, 2021, вып. **3**, стр. 421
 8. V Rozhansky, E Kaveeva, I Senichenkov, D.Sorokina, E Vekshina, D.Coster, P.McCarthy, N.Khromov. Currents structure in the scrape-off layer of a tokamak. //Nuclear Materials and Energy, 2020, V. 25 100840
 9. V Rozhansky, E Kaveeva, I Senichenkov, D.Sorokina, E Vekshina, D.Coster, P.McCarthy, N.Khromov. Current structure in the scrape-off layer of a tokamak in a quiescent state. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2021, V. **63** 015012

Список литературы, цитируемой в автореферате

- [1] J.Wesson. Tokamaks. // Third edition. Clarendon press. Oxford, 2004.
- [2] T. Eich et al. Inter-ELM Power Decay Length for JET and ASDEX Upgrade: Measurement and Comparison with Heuristic Drift-Based Model. // Physical Review Letters, 2011, V.**107** 215001
- [3] Peter C. Stangeby. The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices. // IOP Publishing Ltd. 2000
- [4] T. Eich et al. Scaling of the Tokamak Near Scrape-Off Layer H-mode Power Width and Implications for ITER. // Nuclear Fusion, 2013, V.**53** 093031
- [5] R.J. Goldston. Heuristic drift-based model of the power scrape-off width in low-gas-puff H-mode tokamaks. // Nuclear Fusion, 2012 V. **52** 013009
- [6] V. Rozhansky, E. Kaveeva, I Senichenkov and E Vekshina. Structure of the classical scrape-off layer of a tokamak. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2018 V.**60** 035001
- [7] E.T. Meier et al. Analysis of drift effects on the tokamak power scrape-off width using SOLPS-ITER. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2016 V. **58** 125012
- [8] E.T. Meier et al. Drifts, currents, and power scrape-off width in SOLPS-ITER modeling of DIII-D. // Nuclear Materials and Energy. 2017, V.**12**, pp.937-977
- [9] D. Brida et al. Role of electric currents for the SOL and divertor target heat fluxes in ASDEX Upgrade. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2020 V.**62**, 105014
- [10] M.Komm et al. On the possibility of direct electrical power extraction from scrape-off layer currents in tokamaks. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2019, V.**61** 095017
- [11] M.Wensing et.al. Experimental verification of X-point potential well formation in unfavorable magnetic field direction.// Nuclear Materials and Energy, 2020, V.**25**, 100839
- [12] V.Rozhansky. Modelling of the Edge Plasma with Account of Self-Consistent Electric Fields. // Contributions to plasma physics, 2006 V.**46**, N7-9, 575-585
- [13] V.Rozhansky. Understanding transport barriers through modelling. // Plasma Physics and Controlled Fusion 2004 V.**46**, A1–A17
- [14] V.Rozhansky, E.Kaveeva, I.Senichenkov, D.Sorokina, E.Vekshina, D.Coster,

- P. McCarthy and N Khromov. Current structure in the scrape-off layer of a tokamak in a quiescent state Plasma Physics and Controlled Fusion, 2021, V.**63** 015012
- [15] E.Vekshina, I.Senichenkov, V.Rozhansky, E.Kaveeva, N.Khromov, G.Kurskiev, M.Patrov and Globus-M team. Globus-M plasma edge modeling with B2SOLPS5.2 code. // Plasma Physics and Controlled Fusion 2016 V.**58** 085007
- [16] В.К. Гусев, С.Е. Бендер, А.В. Деч, Ю.А. Косцов, Р.Г. Левин, А.Б. Минеев, Н.В. Сахаров. Методы реконструкции равновесия плазмы на сферическом токамаке Глобус-М // Журнал Технической Физики. 2006 Том **76**. вып. 8. стр. 25-32
- [17] I.Senichenkov et al. Integrated modelling of the Globus-M tokamak plasma and a comparison with SOL width scaling. // Nuclear Fusion 2015 V.**55** 053012
- [18] H J Sun et al. Study of near scrape-off layer (SOL) temperature and density gradient lengths with Thomson scattering. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2015 V. **57** 125011
- [19] С.И.Брагинский. Явления переноса в плазме. Вопросы теории плазмы под редакцией М.А.Леонтовича. // Вып.1 М. ГОСАТОМИЗДАТ, 1963.