

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ИПФ РАН)

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ
ПОДГОТОВЛЕННОЙ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
(ДИССЕРТАЦИИ)

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ТЕРМОМАГНИТНЫХ
ЭФФЕКТОВ
В ДИНАМИКЕ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ

Аспирант: Сладков Андрей Дмитриевич

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
снс Коржиманов Артём Владимирович

Направление подготовки:
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:
01.04.21 Лазерная физика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород
2020

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В космической и астрофизической плазме многие явления связаны с внезапными и интенсивными выбросами энергии: магнитные бури, солнечные вспышки, ускоренные джеты в аккреционных дисках и пр. Выяснение физических механизмов ускорения частиц до высоких энергий в подобных событиях уже в течение многих десятилетий является одной из основных тем исследований в области астрофизической плазмы. В большинстве случаев появление надтепловой компоненты наблюдаемого спектра частиц связывают с развитием турбулентности, генерацией ударных волн или наблюдением процесса магнитного пересоединения. Однако конкретные физические механизмы ускорения зачастую остаются выясненными не до конца.

В дополнение к спутниковым наблюдениям космической плазмы, важную роль в понимании таких высокоэнергичных процессов в плазме играют лабораторные эксперименты. С 1970-х годов с началом работ по лазерному термоядерному синтезу, получило свое начало такое направление, как лабораторная астрофизика. С помощью лазерного излучения оказалось возможным создание плазмы с характеристиками, приближенными к некоторым астрофизическим явлениям. В последние два десятилетия с ростом количества экспериментальных групп с доступом к мощным лазерным системам наблюдается рост количества экспериментов с плазмой высокой плотности энергии. В частности, одним из широко изучаемых явлений является магнитное пересоединение. Для его наблюдения требуется разнонаправленное магнитное поле и замагниченная в нем плазма, которая за счет индуцированного электрического поля ускоряется до скоростей порядка альфвеновских. Данная работа посвящена теоретическому изучению одного из методов наблюдения магнитного пересоединения в лабораторном эксперименте: при столкновении двух плазменных плюмов, рождённых в процессе лазерной абляции и опоясанных самогенерированным магнитным полем.

Несмотря на более чем полувековую работу по изучению физики магнитного пересоединения, всё ещё остаётся нерешёнными ряд ключевых проблем. В недавнем обзоре Звейбель и Ямада [1] выделили четыре наиболее важные из них:

- i Проблема скорости: как теоретически объяснить наблюдаемые в эксперименте высокие скорости пересоединения?
- ii Проблема запуска: сколько энергии может запасть в магнитном поле прежде, чем начнётся процесс пересоединения? Что даёт толчок

старту этого процесса?

- iii Проблема энергетики: как перераспределяется магнитная энергия при пересоединении?
- iv Проблема взаимодействия масштабов: как взаимодействуют микроскопические и глобальные процессы?

Особенностью магнитного пересоединения является то, что скорость пересоединения, которая по сути отражает величину индуцированного электрического поля, остается одного и того же порядка 0.1 при правильной нормировки для различных систем [2], и эта величина может в некоторых случаях на порядки превосходить теоретические оценки. Таким образом, одним из фундаментальных вопросов магнитного пересоединения является понимание механизмов, приводящих к так называемому быстрому пересоединению. Попытки форсировать пересоединение, ускоряя плазму при подлете к области пересоединения, не приводят к существенному изменению скорости присоединения [3]. Лазерная плазма является крайне форсированным случаем, поскольку значения параметра β , или отношение кинетического давления плазмы к магнитному, много больше единицы. Один из вопросов, который обсуждается в нашей работе, заключается в том, возможно ли повысить скорость пересоединения, увеличивая параметр β .

Важным прикладным направлением изучения магнитного пересоединения является лазерный термоядерный синтез с непрямым нагревом мишени [4]. На внутреннюю стенку цилиндра (хольраума) с радиусом порядка сантиметров фокусируются сотни лазерных пучков (192 пучка на установке NIF в США и на строящейся установке УФЛ-2М в Сарове, 172 пучка на установке Laser Megajoule во Франции). В таком эксперименте пересоединение является паразитным эффектом, так как приводит к разрушению устойчивых плазменных конфигураций и тем самым уменьшает эффективность нагрева находящегося в центре хольраума термоядерного топлива рентгеновским излучением плазмы. Таким образом, стоит задача понижения скорости пересоединения, для чего опять же необходимо знать механизмы, приводящие к её повышению. Одним из способов оказания влияния на скорость пересоединения является наложение внешнего (ведущего) магнитного поля, которое может как содействовать процессу, так и противодействовать ему.

В 2006 году антипараллельная конфигурация магнитных полей была исследована с использованием лазеров сверхвысокой мощности [5]. В этом и целом ряде последующих экспериментов твёрдая мишень облучалась двумя наносекундными лазерными импульсами с фокусами, раз-

несёнными на расстояние порядка долей миллиметра. В результате лазерной абляции образовывались два расширяющихся полусферических плазменных облака, называемых плюмами. За счёт эффекта Бирмана плюмы были опоясаны самогенерированным магнитным полем величиной порядка 1 МГс. При расширении плюмов в некоторый момент происходило их столкновение и формирование области с противоположно направленными линиями магнитного поля. В результате запускался процесс магнитного пересоединения, условия протекания которого можно было регулировать изменением расстояния между точками фокусировки лазерных импульсов. Для диагностики магнитного поля в таком эксперименте применяют протонную радиографию, для которой используется вспомогательный пучок энергичных протонов ускоренных субпикосекундным лазерным импульсом, синхронизированным с наносекундными импульсами. В результате удается получить представление о структуре полей внутри плюмов, а также оценить их величину. Одним из развитий этого метода изучения пересоединения, стало наблюдение пересоединения с ведущим магнитным полем, которое удается получить, разбивая мишень на две и меняя угол между ними.

Представленная работа предназначена выступить в качестве теоретического подспорья данным, собранным в ходе недавнего эксперимента на установке Laser MegaJoule (LMJ), проведённом в мае и июне 2019 года. Сравнение результатов моделирования и экспериментов, однако, в работе не представлено, поскольку собранные данные еще не обработаны. В будущем планируется применить полученную численную модель к интерпретации серии экспериментов с ведущим полем.

В работе мы фокусируемся на роли термомагнитных эффектов в лазерно-плазменном эксперименте по магнитному пересоединению с точки зрения численного моделирования. Их рассмотрение, в частности, важно для описания самосогласованной генерации электромагнитных полей. Одним из механизмов такой генерации является эффект Бирмана [6], который отвечает за генерацию магнитных полей порядка мегагаусс в плазменном эксперименте [7]. В будущем мы планируем также учесть термомагнитных эффектов Нернста и Риги-Ледюка, которые устанавливают связь между переносом магнитного поля и тепловым потоком электронов. Эти эффекты не были включены в данную работу, поскольку проблема теплового потока в плазме высокой плотности энергии требует дополнительного исследования.

Целью исследования является

- i Определение наиболее подходящего метода моделирования плазмы с высокой плотностью энергии в условиях лабораторных экспериментов с мощными лазерными пучками, позволяющего проводить полномасштабное трёхмерное моделирование с учётом самогенерированных магнитных полей.
- ii Разработка комплекса программных средств для моделирования замагниченной расширяющейся плазмы, возникающей при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с твердой мишенью.
- iii Выяснение влияния отношения кинетического давления плазмы к магнитному давлению на процесс магнитного пересоединения.
- iv Выяснение роли термомагнитных эффектов в магнитном пересоединении.
- v Определение путём полномасштабного численного моделирования возможностей экспериментального измерения характеристик процесса магнитного пересоединения в условиях экспериментов, проведённых в 2019 году на установке Laser Megajoule (LMJ).

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в определении направления исследований по теме работы, постановке задач и поиске путей их решения. Также автор сделал ключевой вклад в разработку программных средств, использованных в ходе исследования. В третьей главе результаты получены с помощью доработанного кода HECKLE, написанного на C99. Результаты четвертой главы получены с помощью кода, написанного с нуля на C++11, что позволило уменьшить время вычислений. Также на базе кода на C++11 автором был подготовлен программный модуль для протонной радиографии. Все результаты оригинальных исследований, представленных в работе, получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из четырех глав, заключения, одного приложения и списка литературы. Общий объем работы - 149 страниц, включая 58 рисунков. Список цитируемой литературы состоит из 123 наименований.

Краткое содержание работы

В **первой главе** даны определения, необходимые в работе, а также рассмотрены проведённые ранее экспериментальные и численные работы по проблеме магнитного пересоединения с целью выделить фундаментальные особенности этого процесса, которые наблюдаются и в космосе, и в лаборатории, и потенциально в моделировании. В главе обсуждаются основные типы магнитного пересоединения: 1. симметричное, 2. асимметричное, 3. с ведущим полем, 4. форсированное, и рассматриваются исторически первые модели Свита-Паркера и Петчека.

Одним из важных моментов является обсуждение так называемого GEM челенджа [8], который в 2001 году упорядочил результаты в моделировании магнитного пересоединения путём их сравнения для различных моделей, но с одинаковыми начальными и граничными условиями. Итогом этой работы стал вывод об определяющей роли эффекта Холла в быстром магнитном пересоединении, который отвечает за генерацию ускоряющего электрического поля в так называемой ионной диффузионной области, которая располагается вблизи точки пересоединения и имеет размер порядка ионной инерционной длины. В этой области происходит размагничивание ионов, и движение ионов и электронов разделяется, что и приводит к возникновению эффекта Холла. Лейтмотивом всей главы является сравнение скоростей пересоединения в различных токовых конфигурациях. В конце главы кратко перечислены вопросы, которые заслуживают внимания в рамках изучения магнитного пересоединения.

Вторая глава описывает и обосновывает выбранную численную гибридную модель, в которой ионы описываются кинетически, а электроны представлены шестикомпонентным тензором давления (моментом второго порядка функции распределения). Использование тензора давления вызвано важностью учета градиентов температуры электронов в лазерно-плазменном эксперименте. Этот подход противопоставляется наиболее широко используемому изотермическому замыканию, которое предполагает считать температуру постоянной как в пространстве, так и во времени. В главе также обосновывается использование электростатического приближения и обобщённый закон Ома для описания самосогласованного электрического поля, который мы используем в модели, и в который входит в том числе слагаемое с дивергенцией тензора электронного давления.

Для вычисления тензора давления используется полное уравнение его эволюции, выведенное из уравнения Власова и замыкаемое уравнением на тепловой поток. Уравнение эволюции тензора электронного давления

можно разбить на две части: драйвер (на ионном временном масштабе), который отвечает за перенос давления, и циклотронную часть (на электронном временном масштабе), которая описывает вращение электронов на циклотронной частоте. Поскольку мы кинетически описываем только ионы, шаг по времени в моделировании достаточно мал, только чтобы разрешить вращение ионов. В тоже время гиропериод электронов меньше этого времени пропорционально корню из отношения масс ионов к электронам, что требует меньшего временного шага. В работе для циклотронной части уравнения эволюции тензора мы предлагаем новый явный метод интегрирования, который позволил уменьшить время вычислений на 30% по сравнению с неявным [9], но при этом дает аналогичный результат.

Особое внимание уделено вопросу замыкания теплового потока, так как дивергенция теплового потока входит в уравнение эволюции тензора электронного давления. В работе дивергенция теплового потока заменена на изотропизирующий оператор, так как было показано, что без использования какой-либо изотропизации, некоторые компоненты тензора неограниченно растут во времени. Также в главе мы обсуждаем проблему устойчивости интегрирования и рассматриваем численные приемы для борьбы с численными неустойчивостями.

В **третьей главе** разработанный численный метод применяется для анализа двумерного симметричного пересоединения в токовом слое Харриса. Мы рассматриваем бесстолкновительное пересоединение в слое Харриса с пинчем в начальный момент времени для возбуждения нелинейной стадии роста поля пересоединения в единственной X-точке. В противовес многочисленным предыдущим исследованиям [9, 10, 11] нам удалось выявить компоненты, участвующие в росте неустойчивости и требующие обязательной изотропизации. В результате удалось ослабить оператор изотропизации, что позволило впервые в гибридном моделировании пронаблюдать эффект буфуркации токового слоя.

Было показано, что возникновение тонкой структуры в распределении диагональных компонентов тензора в нейтральной плоскости, которая связана с ростом анизотропии электронного давления, приводит к бифуркации токового слоя, что в свою очередь приводит к замедлению конвекции ионов, и как результат, к меньшей скорости пересоединения по сравнению с широко используемым изотермическим замыканием. Помимо замыкания теплового потока оператором изотропизации, автором предлагается способ интегрирования эволюции тензора без использования какого-либо замыкания для теплового потока.

В **четвертой главе** проводится анализ трехмерного численного моделирования лабораторного магнитного пересоединения, наблюдаемого

при столкновении двух лазерно-плазменных плюмов. В первой части обсуждается расширение одного плазменного плюма, а также связанная с ним генерация магнитного поля. В модели мы фокусируемся на учете эффекта Бирмана, который в лазерных экспериментах объясняет происхождение пересоединяющегося магнитного поля плюма. Использование тензора давления дает хорошее качественное совпадение результатов моделирования с результатами полностью кинетических расчетов. Кроме того, наблюдается генерация мелкомасштабного магнитного поля, связанного с развитием неустойчивости вейбелевского типа, которая доминирует на фронте расширяющего плюма.

Во второй части главы мы рассматриваем процесс магнитного пересоединения между двумя плазменными плюмами. Для непосредственного сравнения с результатами эксперимента была также смоделирована протонная радиография полученных в моделировании структур. На снимках синтетической радиографии, то есть полученной с помощью только численного моделирования, удается выделить различные фазы эксперимента: 1. свободное расширение плюма, 2. сжатие магнитного поля и 3. пересоединение. В то же время в эксперименте разрешение по времени для радиографии затрудняет более детальное выделение отдельных фаз. Поскольку нормировка для поля пересоединения в трехмерной задаче и крайне динамической конфигурации затрудняет определение скорости пересоединения, моделирование процесса при различных значениях параметра β позволяют сделать вывод только об относительной динамике. В результате было показано, что увеличение кинетического давления плазмы приводит к более импульсивному процессу магнитного пересоединения.

Научная новизна исследования в представленной квалификационной работе заключается в следующем:

- i Впервые для гибридного моделирования плазмы с использованием шестикомпонентного тензора давления электронов для решения уравнения его эволюции использована явная схема интегрирования циклотронного члена.
- ii Предложены новые подходы к замыканию уравнения эволюции тензора электронного давления, обеспечивающие устойчивость гибридного моделирования.

- iii Впервые для токового слоя Харриса в рамках гибридного моделирования продемонстрирован эффект бифуркации токового слоя и установлена его связь с анизотропией тензора электронного давления.
- iv Впервые проведено трёхмерное моделирование процесса расширения лазерно-плазменного плюма и самогенерации магнитных полей в нём за счёт эффекта Бирмана и развития вейбелевской неустойчивости.

Практическая ценность

Основной практический результат работы представляет собой код, написанный на языке C++11, реализующий описанную во второй главе гибридную модель, и который может быть использован при решении актуальных задач взаимодействия интенсивного лазерного излучения с твердотельными мишенями. С помощью предложенного алгоритма возможно описывать динамику расширяющегося плазменного плюма, при этом учитывая эффекты, связанные с агиротропией и анизотропией давления электронного газа, благодаря учету давления в форме шестикомпонентного тензора.

Важно отметить, что построенная модель представляет собой базовую для бесстолкновительной плазмы - и легко расширяется до столкновительного случая, а также учета термомагнитных эффектов Нернста и Риги-Ледюка. В четвертой главе, будучи упрощенной, наша модель дает хорошее качественное сравнение с полностью кинетической моделью, требуя при этом существенно меньше вычислительных мощностей. Разработанная модель может быть применена для анализа результатов эксперимента на установке LMJ (Бордо), и других аналогичных установок. Полученные результаты представляют интерес как с практической, так и с фундаментальной точек зрения.

Основные положения, выносимые на защиту

- i Разработан и реализован явный численный метод интегрирования циклотронного члена в уравнении эволюции шестикомпонентного тензора электронного давления в рамках гибридного метода моделирования плазмы.
- ii На примере токового слоя Харриса методом гибридного численного моделирования показана связь эффекта бифуркации токового слоя с анизотропией тензора электронного давления.

- iii В трёхмерном гибридном численном моделировании показано, что при расширении лазерно-плазменного плюма наблюдается генерация крупномасштабного тороидального магнитного поля за счёт эффекта Бирмана и мелкомасштабных полей на фронте плюма за счёт развития вейбелевской неустойчивости.
- iv Моделирование протонной радиографии для результатов трёхмерного гибридного численного моделирования процесса столкновения двух лазерно-плазменных плюмов показало возможность наблюдения в проводящихся в настоящее время экспериментах различных этапов процесса магнитного пересоединения и определения его характеристик.

Достоверность

Достоверность результатов, полученных в квалификационной работе, подтверждается их хорошим согласием с результатами проведённых ранее полностью кинетических моделирований похожих конфигураций. Корректность работы кода была проверена на независимых тестовых задачах, а также путем сравнения с результатами, полученными другими численными кодами. Дополнительно с целью сравнения мы проводили расчёты, используя уже апробированную другими авторами неявную схему интегрирования циклотронного члена в уравнении эволюции тензора давления.

Апробация работы

По второй и третьей главе диссертации написана одна статья, направленная в журнал *Physics of Plasmas*[A1], и находящаяся в стадии коррекции после первого раунда рецензий. Также за время аспирантуры были опубликованы три статьи[A2-A4] в рецензируемых журналах по близкой к диссертации теме, в которых автор решал задачу движения заряженных частиц в электромагнитных полях для анализа результатов измерения энергетических спектров протонов, полученных методом парабол Томсона. Эти наработки были использованы при написании кода для протонографии, который широко использовался в четвертой главе.

Первые три главы представленной работы были изложены в диссертации на степень PhD[A5], успешно защищённой 27.09.2019 в рамках совместной аспирантуры с Университетом Пьера и Марии Кюри в Париже. В качестве второго руководителя выступал Рох Смет. Основные результаты работы докладывались на научном семинаре в ИПФ РАН, а также представлены в тезисах докладов двух российских конференций (Нелинейные волны - 2018/2020, Нижний Новгород)[A6-A7].

Работы, содержащие основной результат диссертации:

A1 A. Sladkov, R. Smets, N. Aunai, A. Korzhimanov, Numerical study of non-gyrotropic electron pressure effects in laser-driven magnetic reconnection, *arxiv.org/abs/2006.0177*

A2 К. Ф. Бурдонов, А. А. Еремеев, Н. И. Игнатова, Р. Р. Османов, А. Д. Сладков, А. А. Соловьев, М. В. Стародубцев, В. Н. Гинзбург, А. А. Кузьмин, А. В. Масленникова, Г. Реве, А. М. Сергеев, Ж. Фукс, Е. А. Хазанов, С. Чен, А. А. Шайкин, И. А. Шайкин, И. В. Яковлев, Экспериментальный стенд для исследования воздействия ускоренных лазером протонов на биообъекты, *Квантовая электроника*, Т. 46, № 4, с. 283–287 (2016).

A3 A. Soloviev, K. Burdonov, S. N. Chen, A. Eremeev, A. Korzhimanov, S. Pikuz, G. V. Pokrovskiy, T. A. Pikuz, G. Revet, A. Sladkov, V. Ginzburg, E. Khazanov, A. Kuzmin, R. Osmanov, I. Shaykin, A. Shaykin, I. Yakovlev, M. Starodubtsev, and J. Fuchs, Experimental evidence for short-pulse laser heating of solid-density target to high bulk temperatures, *Scientific Reports*, V. 7, P. 12144 (2017).

A4 С. А. Пикуз, И. Ю. Скобелев, М. А. Алхимова, Г. В. Покровский, Дж. Колган, Т. А. Пикуз, А. Я. Фаенов, А. А. Соловьев, К. Ф. Бурдонов, А. А. Еремеев, А. Д. Сладков, Р. Р. Османов, М. В. Стародубцев, В. Н. Гинзбург, А. А. Кузьмин, А. М. Сергеев, Дж. Фукс, Е. А. Хазанов, А. А. Шайкин, И. А. Шайкин, И. В. Яковлев, “Формирование плазмы с определяющей ролью радиационных процессов при облучении тонких фольг импульсом субпетаваттного лазера PEARL”, *Письма в ЖЭТФ*, 105:1 (2017), 15–20

A5 A. Sladkov, "Numerical modeling of magnetic reconnection in laser-induced High Energy Density Plasmas PhD thesis, 2019

A6 А. Сладков, Р. Смет, А. Коржиманов, Численное исследование влияния эффектов негиротропного тензора электронного давления на магнитное пересоединение в лазерно-плазменном эксперименте. Тезисы докладов молодых ученых. XVIII научная школа «Нелинейные волны – 2018». Нижний Новгород, Россия. 26 февраля — 4 марта 2018. С. 179.

A7 А. Сладков, Р. Смет, А. Коржиманов, Трёхмерное численное моделирование явления магнитного пересоединения в лазерно-плазменном эксперименте. Тезисы докладов молодых ученых. XIX научная школа «Нелинейные волны – 2020». Нижний Новгород, Россия. 29 февраля — 6 марта 2020. С. 236.

Литература

- [1] *Zweibel E. G., Yamada M.* Perspectives on magnetic reconnection // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 2016. C.472, 2196. №.20160479.
- [2] *Cassak P., Liu Y.-H., Shay M.* A review of the 0.1 reconnection rate problem // Journal of Plasma Physics 2017. C.83, 5.
- [3] *Birn J., Galsgaard K., Hesse M., Hoshino M., Huba J., Lapenta G., Pritchett P., Schindler K., Yin L., Büchner J., others* Forced magnetic reconnection // Geophysical research letters 2005. C.32, 6.
- [4] *Atzeni S., Meyer-terVehn J.* The Physics of Inertial Fusion: BeamPlasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter 2004. C.125.
- [5] *Nilson P. M., Willingale L., Kaluza M. C., Kamperidis C., Minardi S., Wei M. S., Fernandes P., Notley M., Bandyopadhyay S., Sherlock M., Kingham R. J., Tatarakis M., Najmudin Z., Rozmus W., Evans R. G., Haines M. G., Dangor A. E., Krushelnick K.* Magnetic Reconnection and Plasma Dynamics in Two-Beam Laser-Solid Interactions // Phys. Rev. Lett. 2006. C.97. №.255001.
- [6] *Biermann L., Schlüter A.* Cosmic radiation and cosmic magnetic fields. II. Origin of cosmic magnetic fields // Physical Review 1951. C.82, 6. №.863.
- [7] *Lancia L., Albertazzi B., Boniface C., Grisolle A., Riquier R., Chaland F., Le Thanh K.-C., Mellor P., Antici P., Buffechoux S., others* Topology of megagauss magnetic fields and of heat-carrying electrons produced in a high-power laser-solid interaction // Physical review letters 2014. C.113, 23. №.235001.
- [8] *Birn J., Drake J., Shay M., Rogers B., Denton R., Hesse M., Kuznetsova M., Ma Z., Bhattacharjee A., Otto A., others* Geospace Environmental Modeling (GEM) magnetic reconnection challenge //

Journal of Geophysical Research: Space Physics 2001. C.106, A3. №. 3715–3719.

- [9] *Hesse M., Winske D.* Hybrid simulations of collisionless reconnection in current sheets // Journal of Geophysical Research: Space Physics 1994. C. 99, A6. №. 11177–11192.
- [10] *Kuznetsova M. M., Hesse M., Winske D.* Kinetic quasi-viscous and bulk flow inertia effects in collisionless magnetotail reconnection // J. Geophys. Res. 1998. C.103. №. 199-214.
- [11] *Yin L., Winske D., Gary S. P., Birn J.* Hybrid and Hall-MHD simulations of collisionless reconnection: Dynamics of the electron pressure tensor // J. Geophys. Res. 2001. C. 106. №. 10761-10776.