

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
от 22 декабря 2021 г. (протокол № 33)

**Защита диссертации Пугачёвой Дарьи Валерьевны  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
«Лазерно-плазменное ускорение поляризованных заряженных частиц»**

Специальность 1.3.9 – физика плазмы

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
Протокол № 33 от 22 декабря 2021 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк (ред. 1046/нк от 15.10.2021г.) в составе 30 человек. На заседании присутствуют 20 человек, из них 11 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 9 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

**Председатель** – И.О. Зам. председателя диссертационного совета  
24.1.193.01 (Д 002.110.02) д.ф.-м.н., профессор Храпак А.Г.

**Ученый секретарь** – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01  
(Д 002.110.02) к.ф.-м.н. Васильев М.М.

1. Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Подключен
2. Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14 Присутствует
3. Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Отсутствует
4. Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	1.3.9 Присутствует
5. Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14 Подключен
6. Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9 Присутствует
7. Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14 Присутствует
8. Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Отсутствует
9. Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14 Отсутствует
10. Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	1.3.14 Подключен
11. Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Подключен
12. Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Подключен
13. Гавриков А.В.	Д.ф.-м.н., доцент	1.3.14 Присутствует
14. Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Присутствует
15. Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	1.3.14 Подключен
16. Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	1.3.9 Присутствует
17. Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14 Присутствует
18. Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.14 Присутствует
19. Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14 Подключен
20. Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Отсутствует
21. Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14 Отсутствует
22. Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Отсутствует
23. Медин С.А.	Д.т.н., профессор	1.3.14 Отсутствует
24. Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14 Подключен
25. Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Отсутствует
26. Савватимский А.И.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	1.3.14 Подключен
27. Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14 Отсутствует
28. Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Отсутствует
29. Филиппов А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9 Присутствует
30. Яньков Г.Г.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.9 Подключен

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации младшего научного сотрудника лаборатории 1.3 – теории лазерной плазмы Отдел №1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Пугачёвой Дарьи Валерьевны** на тему «Лазерно-плазменное ускорение поляризованных заряженных частиц». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 1.3 – теории лазерной плазмы Отдел №1 ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, [jiht.ru](http://jiht.ru)).

### **Научный руководитель:**

**Андреев Николай Евгеньевич** – д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией 1.3 – теории лазерной плазмы Отдел №1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

### **Официальные оппоненты:**

**Костюков Игорь Юрьевич** - гражданин РФ, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, заведующий отделом сверхбыстрых процессов федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук» (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

**Бочкарев Сергей Геннадьевич** – гражданин РФ, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук» (119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53).

### **Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»** (МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1.)

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., заведующий отделом Костюков И.Ю. и к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Бочкарев С.Г., научный руководитель Пугачёвой Д.В. д.ф.-м.н. Андреев Н.Е.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Мы приступаем к следующей защите, а именно к защите диссертации Дарьи Валерьевны Пугачёвой на тему «Лазерно-плазменное ускорение поляризованных заряженных частиц». И Михаил Михайлович нам расскажет какие документы представлены соискателем к защите.

### Ученый секретарь

*(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).*

### Председатель

Если вопросы отсутствуют, то давайте предоставим слово Дарье Валерьевне Пугачёвой, изложить основные положения ее диссертации.

### Пугачёва Д.В.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Пугачёвой Д.В. прилагается).*

### Председатель

Есть ли вопросы? Пожалуйста, Равиль Хабибулович.

### Амиров Р.Х.

Не могли бы вы назвать параметры при которых работает ваш ускоритель: начальная энергия электронов, характерные темпы ускорения, характерная длительность, конечная энергия ускоренных электронов, газ какой, размер, какие эксперименты имелись в виду в ваших численных расчетах?

### Пугачёва Д.В.

Если мы рассматриваем режим, который в основном изучался в этой работе, а именно умеренно нелинейный, то здесь у нас характерный градиент ускоряющего поля 14 ГэВ/м. При таком ускорении частицы могут набрать порядка 10 ГэВ на длине 1 м, это примерно соответствует длине дефазировки. В данной работе распространение лазерного импульса происходило в плазменном канале с параболическим профилем плотности. Плотность электронов на оси канала была  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Здесь параметры были подобраны таким образом, чтобы лазерный импульс мог распространяться на многие длины Релея без дифракции, для того чтобы ускорение могло происходить эффективно.

### Председатель

Есть ли ещё вопросы? Пожалуйста.

### Филиппов А.И.

Дарья Валерьевна, в чем все-таки физика различного поведения позитронов и электронов в поле лазерного излучения?

### **Пугачёва Д.В.**

Если мы говорим о линейном или умеренно нелинейном режимах, то отличие заключается в том, что нам нужно инжектировать частицу в правильную фазу кильватерного поля, то есть ускоряющая фаза для электронов будет замедляющей для позитронов, соответственно нам нужно инжектировать их в другую фазу. Если мы говорим про умеренно нелинейный режим, то потенциал для частиц несимметричный, поэтому ускорительная фаза для позитронов будет укорачиваться. Если мы говорим про линейный режим, то здесь у нас фактически нет никакого различия в ускорении электронов и позитронов, просто нужно инжектировать в правильную фазу.

### **Председатель**

Есть ли вопросы по Zoom?

### **Савватинский А.М.**

Скажите, пожалуйста, вот у вас используется такое слово эмиттанс. Эмиттанс по английски — испускать. В вашей терминологии это сгусток или пучок. Вы не могли бы определить слово эмиттанс и указать его размерность?

### **Пугачёва Д.В.**

Эмиттанс имеет размерность мм мрад, его определение написано на этом слайде, то есть он включает в себя среднее отклонение координат частиц в пучке от их среднего значения, а также учитывает отклонение от углов разлета частиц в этом пучке.

### **Председатель**

Есть ли ещё вопросы? Если вопросов больше нет, то я хотел бы попросить научного руководителя диссертантки, профессора Андреева Николая Евгеньевича.

### **Андреев Н.Е.**

Добрый день, уважаемые коллеги. Дарья Валерьевна пришла к нам в лабораторию больше 5 лет назад, и с самого начала она пришла, проявив большой интерес к этой области исследований, которая вообще уже в это время переживала, можно сказать, свой пик, потому что экспериментально было показано, что такой метод, как лазерно-плазменное ускорение, возможен и эффективен, но когда стало понятно, что это возможно, встал вопрос о конечных характеристиках пучка. Собственно, это было главной задачей той работы, которую она проделала, потому что если речь о коллайдерах, я почему говорю немножко о науке, потому что именно ее интерес к этому и самостоятельный поиск путей решения характеризуют ее работу. Так что, если не вдаваться в подробности того, что она рассказывала, можно сказать, что поиск малоэмиттансоного ускорения и поляризованных пучков — это все принципиально важные конечные характеристики пучка, которые могут использовать в экспериментах по физике высоких энергий, в частности для исследования слабого взаимодействия. Дальше она выросла в самостоятельного научного работника. Я думаю, что ее работа достаточно ясно это показывает.

### **Председатель**

Спасибо, Николай Евгеньевич. Дальше я хочу попросить ученого секретаря нашего совета огласить отзыв ведущей организации и другие поступившие в наш совет отзывы на автореферат.

## Ученый секретарь

Уважаемые коллеги, сейчас я по поручению председателя диссертационного совета должен буду огласить отзывы ведущей организации и поступившие на автореферат. В качестве **ведущей организации** выступал **Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова**. Отзыв содержит в себе структуру диссертации, анализ актуальности проведенных исследований, научную новизну и достоверность результатов, полученных соискателем Дарьей Валерьевной. Я, с вашего позволения, полностью отзыв зачитывать не буду, а остановлюсь на **замечаниях**, в нем сформулированных.

Первое замечание: подавляющее большинство расчетов в работе проведено для одного набора параметров, либо в узком диапазоне параметров. Хотя расширение диапазона параметров и требует существенного времени для расчетов, тем не менее в диссертации хотелось бы, во-первых, найти обоснование выбранных для расчета параметров, а, во-вторых, обсуждение реалистичности тех или иных режимов с точки зрения их экспериментальной реализации, а также возможных последствий ухода от выбранного диапазона параметров. В большинстве представленных в работе результатов оба эти момента отсутствуют.

Второе: для ввода пучка в ускоряющую стадию с минимальным ростом эмиттанса предлагается использовать линейный нарастающий профиль плазмы. Не обсуждается, является ли выбранная протяженность линейно нарастающего участка оптимальной. Что изменится, если взять другой профиль, например гауссов или экспоненциальный, как более близкие к экспериментально реализуемым.

Третье: получены оптимальные условия инжекции для минимизации деполяризации, определяющие фазу инжекции и ограничивающие начальный радиус пучка. К какому ограничению на заряд пучка это приведет? На сколько уменьшится заряд пучка такого плазменного ускорителя при выполнении условий, необходимых для минимизации деполяризации?

Четвертое: в работе отсутствует определение ряда ключевых параметров (эмиттанс, слайсовый эмиттанс и др.), которые приняты в ускорительном сообществе, однако в рамках рассматриваемой диссертации, на наш взгляд, нуждаются в пояснении.

Пятое: подпись к рисунку 1.5 сделана неудачно – понять, что именно показано на этом рисунке сразу не получается.

Шестое: в работе можно найти опечатки, синтаксические и орфографические ошибки.

Седьмое: список публикаций по диссертации не содержит публикаций в высокорейтинговых журналах из первого или второго квартала, хотя полученные результаты вполне соответствуют этому уровню.

Вместе с тем делается заключение, что проведенные исследования обладают научной и практической значимостью, все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общую значимость диссертационной работы, а соискатель соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения № 842 о порядке присуждения ученых степеней. Отзыв составлен и подписан Савельевым-Трофимовым Андреем Борисовичем и заведующим кафедрой общей физики Макаровым.

Кроме отзыва ведущей организации на разосланный автореферат поступило **4 отзыва** из разных организаций, **все отзывы положительные**, и ряд имеется замечаний.

**Первый отзыв** поступил из **Сколковского института науки и технологий**,

отзыв составлен и подписан доцентов Центра по технологиям искусственного интеллекта **Рыковановым Сергеем Георгиевичем**. Отзыв положительный, имеются замечания:

- недостатком работы является узкий диапазон параметров, используемых при моделировании динамики кильватерного поля лазерного импульса
- отсутствуют оценки допустимого отклонения от используемых параметров лазерного импульса и плазмы, позволяющие понять в каком случае справедливы полученные в работе результаты и выводы;
- на Рис. 5 не хватает сравнения со случаем ввода и вывода пучка в ускорительную секцию с резкой границей плазмы;
- отсутствует явное определение эмиттанса сгустка.

**Второй отзыв** поступил из **Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Академии Наук**. Составлен и подписан главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук, профессором РАН **Лотовым Константином Владимировичем**. Отзыв положительный, без замечаний.

**Третий отзыв** поступил из **Национального исследовательского университета МИФИ**. Отзыв составил и подписал доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики **Попруженко Сергей Васильевич**. Отзыв положительный, без замечаний.

**Четвертый отзыв** поступил из **Всероссийского научно-исследовательского института автоматики имени Н.Л. Духова**, составлен и подписан старшим научным сотрудником, кандидатом физико-математических наук **Дьячковым Сергеем Александровичем**. Отзыв положительный, имеются замечания:

- отсутствие сведений об используемых методах и схемах численного решения;
- второе: для некоторых численных расчетов, описывающих динамику деполяризации, не хватает сопоставления с аналитическими результатами.

### Председатель

Дарья Валерьевна, вам предоставляется возможность ответить на замечания, сформулированных в письменных отзывах.

### Пугачёва Д.В.

Начнем с замечания, которое касается области выбранных параметров. Здесь следует сказать о том, что такие параметры выбраны неслучайно, потому что преследовалась определенная цель. Цель заключалась в том, чтобы пучки частиц можно было ускорить максимально эффективно, т. е. в полях с большим градиентом ускорения, но в то же время нужно было сохранить качество этих сгустков и сохранить возможность управлять фазой, для того чтобы успешно инжектировать их в следующий каскад. Именно поэтому был выбран умеренно нелинейный режим, а не сильно нелинейный, потому что там контролировать фазу сложнее. Был выбран не линейный, потому что там градиенты ускорения меньше. Если мы используем сабпетаваттный лазерный импульс, то достаточно сложно сильно уйти от предложенных параметров, потому что параметры лазерного импульса соответствуют некоторым характерным параметрам, которые существуют на экспериментальных установках, а параметры плазменного канала были подобраны таким образом, чтобы у нас лазерный импульс мог бездифракционно распространяться на многие длины Релея, и мы могли на большом расстоянии эффективно ускорять наши частицы. Что будет, если мы начнем уходить от этих параметров. Если мы будем сильно их варьировать, то мы будем уходить в другие режимы, либо в линейный, либо в сильно нелинейный, в зависимости от того, уменьшаем или увеличиваем мы интенсивность лазерного импульса. В линейном случае у нас был расчет для позитронов и электронов, и

там выводы не меняются, потому что процесс ускорения имеет такой же характер. Если же мы говорим про сильно нелинейный режим ускорения, то его наша модель не описывает, и там нужно применять многомерные PIC расчеты, которыми в данной работе я не занималась. Это то, что касается выбора параметров.

**Определение эмиттанта** тут по ссылке на литературу в работе, формула не приведена, я привела ее в докладе.

Были **замечания по поводу подписи к рисунку**, конечно нужно было более явно обозначить, что изображено на рисунке, чтобы не возникало таких вопросов.

Было **замечание по поводу отсутствия описания схем**. Действительно, в диссертации явно не написано, но в работе использовалась схема второго порядка, Эйлер с пересчетом, для решения уравнений, ничего более хитрого там не было.

## Председатель

Спасибо, теперь слово предоставляется официальному оппоненту **Бочкареву Сергею Геннадьевичу** из ФИАН.

## Бочкарев С.Г.

Добрый день, меня зовут Сергей Бочкарев, я представляю Физический институт Академии наук. Я являюсь официальным оппонентом диссертационной работы Дарьи Пугачёвой. Хотел бы сказать, что у меня нет сомнений относительно актуальности. Безусловно, тематика очень актуальна. Как и было сказано научным руководителем Николаем Евгеньевичем Андреевым, уже почти 20 лет назад получены хорошие сгустки ускоренных заряженных частиц, электронов, с помощью кильватерных механизмов ускорения. Дальше стоит очень важный вопрос, собственно, на него отвечает Дарья в этом большом труде, я бы сказал так. В этой диссертации Дарья Валерьевна описывает оптимизацию этой задачи, а именно оптимизацию ускорения заряженных частиц с учетом заданной поляризации, спиновой поляризации, ее сохранение, минимизацию эмиттанта и так далее. То есть цель — подготовить, создать ускоренные пучки заряженных частиц для применения, скажем так, в коллайдерах с помощью лазерного подхода. Лазерные источники, как известно, компактные, то что называется table-top, по сравнению с огромными стандартными ускорителями, которые используются, темп ускорения гораздо выше, чем в стандартных.

Я бы хотел сказать, что у меня 4 замечания. Очень кратко, так получается, что все эти замечания были озвучены фактически в предыдущих отзывах и в отзыве ведущей организации, а отзыве, я так понимаю, на автореферат. То что уже звучало, вот **первое замечание** касается учета собственного заряда инжектированного пучка, необходимо конечно указать для каких зарядов можно применять эту теорию, но я вижу, что на слайдах это уже есть, то есть вот ответ присутствует, это в диссертации не было обозначено. Очень приятно, что замечание учтено.

**(Второе замечание)** Второй вопрос был связан с терминологическими особенностями. Очень часто буквально разные термины встречаются для одного и того же: синхротронное, бетатронное, что имеется в виду? Вот такой вопрос, потому что они буквально и в автореферате, и в тексте диссертации перекликаются.

**(Третье замечание)** Третий вопрос связан с тем, что самосогласование параметров, самосогласованный радиус, не везде обозначено, как выбирался радиус. В частности, глава 1, раздел 1.4: с целью оптимизировать характеристики, как выбирался этот согласованный радиус для нелинейного режима, именно нелинейного, потому что в линейном режиме понятно, в нелинейном там сложнее.

**(Четвертое замечание)** И четвертый вопрос опять же уже звучал. По поводу такого понятия как эмиттанс. Он явно не обозначен, но уже учтен в докладе. Очень

приятно было слушать доклад. Практически все вопросы, которые у меня возникали... Ответы я увидел в докладе. Так что я хотел бы поблагодарить Дарью Валерьевну за построение доклада. В общем-то все, все мои вопросы.

**Отзыв положительный.** Безусловно, без сомнения, что эта диссертация достойна присуждения степени кандидата физико-математических наук. Уровень очень высокий у диссертации, что подтверждается достойными публикациями, безусловно. И очень интересные задачи были рассмотрены в диссертации, что подчеркивает высокую квалификацию будущего кандидата наук, и у меня нет сомнения, что эта диссертационная работа является очень перспективной и в дальнейшем стоит развивать это направление.

Спасибо большое за внимание!

### **Председатель:**

Спасибо. Дарья Валерьевна, не смотря на то что Сергей Геннадьевич уже сказал, что большая часть его замечаний... Он увидел ответы в вашем докладе, тем не менее у вас есть возможность еще раз, может быть, повторить эти ответы.

### **Пугачёва Д.В.**

Про согласование лазерного импульса и плазменного канала, действительно, я уже отвечала на отзыв ведущей организации. *(Первое замечание)* Здесь я хотела показать слайд с оценкой на заряд пучка. Действительно, в работе не учитывается эффект лоудинга, т. е. эффект самовоздействия заряженных частиц. Если делать оценку, то 80 пКл — это ограничение на заряд.

*(Второе замечание)* По поводу терминов, действительно, в работе встречается и синхротронное, и бетатронное излучение, но я не вкладывала разный смысл в эти определения. Имелось в виду во всех случаях излучение, испускаемое частицами при совершении ими бетатронных колебаний.

### **Председатель**

Сейчас по регламенту мы должны предоставить слово второму оппоненту и, по-видимому, он сможет выступить со своим отзывом по интернету. Если нет, то мы попросим Михаила Михайловича зачитать его отзыв.

### **Костюков И.Ю.**

Уважаемые коллеги, меня зовут Игорь Костюков, и для меня является большой честью выступить перед аудиторией, перед сотрудниками Объединенного института высоких температур. Так получилось, что я не смог лично присутствовать защите, поэтому разрешите мне, пожалуйста, представить свой отзыв онлайн. Постараюсь быть кратким. Мне в принципе работа понравилась, несомненно тема диссертации является очень актуальной. Если говорить о лазерно-плазменных методах ускорения, то основных приложений этих методов два. Если энергия электронов менее 10 ГэВ, то это источники излучения, лазер на свободных электронах, и эта задача частично была решена. В этом году вышла статья от китайских коллег, где они продемонстрировали лазер на свободных электронах с помощью лазерно-плазменного ускорения, но правда там лазер на свободных электронах работал в диапазоне экстремального ультрафиолета. Было бы, конечно, интересно построить такой лазер на рентгеновском диапазоне. Другое применение лазерно-плазменных методов, которое, конечно, более амбициозно и более сложное — это вот коллайдер, т. е. это источники высоких энергий, и тут работы непочатый край, и в этом смысле диссертация Дарьи Валерьевны имеет высокую значимость. Более того, надо сказать, что Дарья Валерьевна со своими соавторами являются в некотором смысле

первопроходцами, т. е. некоторые задачи были вообще впервые были рассмотрены. Задачи по динамике поляризации электронов в кильватерной волне и учет многостадийности ускорения. Мне понравился обзор литературы, т.е. ей удалось в такой краткой форме рассказать и перечислить основные режимы лазерно-плазменного ускорения так, что мы даже используем этот обзор литературы для того, чтобы учить наших студентов. Как уже Дарья Валерьевна говорила, основные задачи — это описание динамики поляризации частиц при ускорении, анализ многостадийных ускорителей, а также учет радиационных потерь. Если говорить про замечания, то основные замечания уже были отмечены в предыдущих отзывах, и в ведущей организации, и в отзывах на автореферат, и в отзыве предыдущего оппонента. На мой взгляд они все связаны с тем, что диссертация написана слишком кратко, и многие замечания можно было бы избежать, если бы соискатель смогла более подробно некоторые темы осветить.

**(Первое замечание)** В частности, если говорить про обзор литературы, если говорить про методы ускорения, то там, действительно, очень неплохо, мне показалось, написано. Но вот если говорить непосредственно о теме диссертации, а именно о динамике поляризации пучка, то тут как-то мне показалось очень слабо современное состояние было описано. Дело в том, что параллельно, ну в чем-то, конечно, Дарья Валерьевна с соавторами опережала других коллег, но в то же время, на момент диссертации были получены результаты группой профессора Кайтеля из Института ядерной физики Макса Планка, группой профессора Пухова из Университета Дюссельдорфа, группой профессора Ци из Института оптики и точной механики Шанхая и группой профессора Джоши из Университета Калифорнии. Можно было, конечно, результаты, полученные этими группами, в историческом обзоре описать.

**(Второе замечание)** Другое замечание, оно повторяется из отзыва в отзыв, это связано с определением эмиттанса. Определений очень много, бывает нормализованный, ненормализованный, статистический, в следовом пространстве и так далее. Поскольку в работе используется в рисунках эмиттанс с указанием абсолютного значения, то, конечно, важно четко определять, что здесь имелось в виду, какой эмиттанс. Нужно привести формулу и описать все величины, которые в эту формулу входят.

**(Третье замечание)** Также на странице 65 говорится о наличии зависимости динамики деполяризации от динамики эмиттанса, но учитывая, что цель диссертации является исследование динамики поляризованных сгустков, то в проведенном в разделе 2.1 исследовании динамики слайсового эмиттанса было бы уместным продемонстрировать данную зависимость для параметров, используемых в данной диссертации. Тут уже поднималось, это узкий диапазон начальных условий исследовался в диссертации, не все возможные случаи исследовались, желательно было бы, конечно, посмотреть более широкий диапазон начальных условий и параметров, для того, чтобы продемонстрировать те результаты, которые были заявлены в диссертационной работе.

**(Четвертое замечание)** Дальше, например, тоже в комментарии к рисунку 2.4 сказано, что аналитическая кривая достаточно хорошо описывает конечное значение деполяризации после ускорения в первой стадии, но, с другой стороны, видно, что, на самом-то деле, совпадение не очень хорошее, т. е. если аналитическая кривая, допустим спадает, то численное решение выглядит скорее как некоторая такая константа. Такое утверждение требует дополнительных пояснений.

**(Пятое и шестое замечания)** Два других замечания связаны с ускорением электронов и позитронов. Действительно, оказывается, что если мы начинаем учитывать нелинейность, то возникает такая асимметрия между ускорением электронного и позитронного сгустков, и, например, для того чтобы исследовать динамику поляризации электронные и позитронные сгустки брались с одинаковыми начальными условиями, но по факту позитронный сгусток оказывался несогласованным. Вот если говорить про

коллайдер, то скорее всего там в позитронной части ускорителя позитронный сгусток будет согласованным. Поэтому, конечно, надо провести исследование, когда и электронный сгусток будет согласованным, и позитронный будет согласованным. А лучше конечно провести полное исследование, когда и сгусток согласованный, и когда одинаковые начальные условия. Это же относится и к шестому вопросу.

*(Седьмое замечание)* Дальше если говорить, то тут упоминается эффект Соколова — Тернова, приводится некая формула, но в этой формуле используется постоянное магнитное поле, которое фактически вызывает синхротронное излучение, и дальше возникает эффект Соколова — Тернова. Однако без всякого пояснения в эту формулу подставлена величина ускоряющего градиента кильватерной волны, аналогичного магнитного поля тут нет, и непонятно, почему можно вот так просто заменить магнитное поле в формуле Соколова — Тернова на ускоряющий градиент.

*(Восьмое и девятое замечания)* Также есть ещё небольшие ошибки и опечатки в формулах и в тексте.

Но так, конечно, несмотря на все отмеченные недостатки диссертация, конечно, хорошая. Недостатки не снижают общей положительной оценки работы и ее научной значимости, и новизны. Оценивая работу в целом, отмечу, что работа выполнена на очень высоком научном уровне и демонстрирует важный вклад соискателя в разработку обсуждаемых проблем. Таким образом, диссертация представляет собой законченную научную работу, которая полностью соответствует требованиям специальности «физика плазмы» и удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Пугачёва Дарья Валерьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «физика плазмы».

Спасибо за внимание.

### **Председатель**

Спасибо, Игорь Юрьевич. Дарья Валерьевна, сейчас у вас есть возможность ответить на замечания оппонента.

### **Пугачёва Д.В.**

*(Четвертое замечание)* Начнем с рисунка диссертации, где сравнивалась аналитическая зависимость и результаты моделирования. Здесь у нас три последовательные стадии, и аналитическая зависимость фактически описывает некоторую нижнюю огибающую у колебаний деполяризации. Когда они сопоставлялись сравнивалось именно конечное значение деполяризации после ускорения на этапе. Соответственно, если мы посмотрим на первую стадию, то, действительно, аналитическая зависимость поведение деполяризации не отражает, но если мы достроим здесь некоторую огибающую колебаний и сравним с конечным значением аналитики, то увидим, что конечное значение, в принципе, в хорошем согласии. Если же мы теперь без введения адиабатичности сразу наш пучок поместим во вторую стадию и будем ускорять, то тут если мы проведем огибающую, то мы увидим некоторый зазор, который образуется между конечным значением аналитической формулы и тем, что мы видим в моделировании, строя такую огибающую. И при дальнейшем ускорении этот зазор ещё больше увеличивается, т. е. имелось в виду именно это.

*(Седьмое замечание)* Теперь про оценку характерного времени деполяризации. На самом деле, именно в таком виде эта оценка была получена в работе Александра Пухова, на которую ссылка есть в диссертации. И там логика была следующая: характерное время радиационной поляризации включает в себя производную от скорости, т. е. ускорение, точнее модуль его. И мы можем провести некоторую оценку на модуль этого ускорения, исходя из силы Лоренца, и поскольку у нас здесь электрическое поле у нас больше, чем

магнитное, то мы можем использовать именно его для оценки. Это то, что содержится в работе Пухова.

*(Пятое и шестое замечания)* Я согласна с тем, что при рассмотрении ускорения электронов и позитронов нужно и в том, и в том случае использовать согласованные параметры, если проводить дальнейшие исследования, потому что они являются более правильными с точки зрения того, что мы хотим в результате получить сгусток хорошего качества, как электронный, так и позитронный.

### **Председатель**

Спасибо еще раз. Теперь у нас есть возможность для дискуссии по диссертации. Кто хотел бы высказаться?

### **Филиппов А.В.**

Я внимательно изучал диссертационную работу Дарьи Валерьевны, так как входил в комиссию. Мне работа понравилась. Сегодня Дарья Валерьевна, несмотря на заметное волнение, очень хорошо донесла до нас содержание своей диссертационной работы. Результаты работы опубликованы, судя по подготовленному протоколу, в 8 работах, а судя по автореферату в 9, из них 3 статьи в Квантовой электронике опубликовано, это ведущий журнал российский по исследованиям в области физики лазеров и их применению, также еще одна статья опубликована в European Physical Journal Special Topics, который совсем недавно входил в Q1, а теперь входит в Q2, потому что результаты опубликованы в очень хороших журналах. Сама диссертация очень достойная, поэтому я всех призываю голосовать «за», и сам буду голосовать «за».

### **Председатель**

Еще кто-нибудь хочет выступить? По интернету? Ну если нет желающих, я думаю, мы можем дискуссию на этом завершить. И так, теперь, Дарья Валерьевна, вам предоставляется заключительное слово.

### **Пугачёва Д.В.**

Я хотела бы поблагодарить всех за ценные замечания и пожелания касательно диссертационной работы. Это все действительно можно будет учесть при поведении дальнейших исследований. Большое спасибо Костюкову Игорю Юрьевичу за предоставленные ссылки на работы других коллег по этой теме, я обязательно с ними ознакомлюсь, с теми, с которыми еще не ознакомилась. Большое спасибо Сергею Геннадьевичу Бочкареву за, опять же, пожелания к диссертации, за акцент на терминологию, потому что правильную терминологию, действительно, важно употреблять, чтобы не было никаких недопониманий. Ведущей организации я также признательна за ценные замечания, особенно за то, что касается параметров, потому что, действительно, параметры нужно выбирать обосновано и указывать четко и ясно, почему те или иные параметры были выбраны. Также спасибо за вопросы, которые были заданы. Надеюсь, что диссертация оставила хорошие впечатления. Спасибо.

### **Председатель**

Спасибо. Ну, теперь настал момент голосования. Необходимо провести полностью электронное голосование, все члены совета, которые присутствуют и очно здесь в зале, и онлайн, пользуясь функционалом нашего сайта могут свой голос онлайн отдать за присуждение степени соискателю. Ссылка Вам всем была разослана, у меня просьба, это можно сделать и с мобильного телефона, и с любого электронного устройства, которое у

Вас есть с собой и имеет выход в интернет. Можно зайти на сайт и по этой ссылке проголосовать. Если у вас с собой нет электронного носителя, можно подойти к ноутбуку, который тут стоит в президиуме, ввести свой логин и пароль, и точно свой голос, свое волеизъявление привести. Сейчас голосование открыто, и как таковая счетная комиссия не нужна, все происходит в автоматическом режиме подсчета, так что результат голосования мы с вами узнаем, и я Вам его оглашу. Пожалуйста, прошу приступить к голосованию. *(Проводится процедура тайного голосования).*

### **Ученый секретарь**

Уважаемые коллеги, состоялось голосование. У нас 20 членов диссертационного совета присутствовало: очно - 10 и заочно - 10. Из них по специальности было **11**, по профилю, из них **все 20 проголосовали, все 20 проголосовали «за»**. Мы должны сначала утвердить, если нет никого «против» и воздержавшихся, то теперь можем поздравить Дарью Валерьевну. *(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно).*

### **Председатель**

Теперь мы должны обсудить проект заключения, при этом я обращаюсь к присутствующим, высказать свои замечания по поводу проекта. Есть такие? *(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).* По интернету никто не хочет что-то изменить, добавить? Тогда с обсуждением мы заканчиваем, мы должны проголосовать за проект заключения. Кто «за», прошу поднять руки. Кто «за»? Кто «против»? «Воздержался»? Нет. Проект заключения принимается единогласно, спасибо за внимание всем. *(Проект заключения принят единогласно).*

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01  
(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ  
ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 22.12.2021г. № 33

О присуждении Пугачёвой Дарье Валерьевне, гражданке Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Лазерно-плазменное ускорение поляризованных заряженных частиц» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 21.10.2021г., (протокол заседания № 24) диссертационным советом

Д 002.110.02 (24.1.193.01), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г. (ред. 1046/нк от 15.10.2021г.)

Соискатель Пугачёва Дарья Валерьевна 1991 года рождения, в 2015 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории №1.3. – теории лазерной плазмы Отдел №1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2021 году окончила очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)»

Диссертация выполнена в лаборатории №1.3. – теории лазерной плазмы Отдел №1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией №1.3. – теории лазерной плазмы Отдела №1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Андреев Николай Евгеньевич

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий отделом сверхбыстрых процессов Федерального исследовательского центра «Института прикладной физики Российской академии наук» Костюков Игорь Юрьевич;

- кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук» Бочкарев Сергей Геннадьевич

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва) в своем положительном заключении, составленном профессором кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова Савельевым-Трофимовым А.Б. (утвержденном 19.11.2021г. проректором-начальником Управления научной политики МГУ им. М.В.Ломоносова Федяниным А.А.) указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов. Проведены важные и актуальные исследования динамики спиновой поляризации электрона при различных режимах лазерно-плазменного ускорения. Получены интересные результаты для различных способов сохранения качества сгустка заряженных частиц при многостадийном лазерно-плазменном ускорении. Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, российских и международных проектах, нацеленных на получение высококачественных ультрарелятивистских электронных и позитронных сгустков заданной спин-поляризации, ускоренных с помощью лазерно-плазменных методов, в частности, в проектах XCELS, FACET и EuPRAXIA.

Соискатель имеет 9 опубликованных работ по теме диссертации в реферируемых журналах, 8 из которых из списка ВАК:

1. *Пугачёва Д. В., Андреев Н. Е.* Динамика прецессии спина релятивистского электрона при лазерно-плазменном ускорении //Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – №. 1. – С. 88-93.

2. *Pugacheva D. V., Andreev N. E., Cros B.* Laser wakefield acceleration of polarized electron beams //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Т. 774. – №. 1. – С. 012107.

3. *Пугачёва Д. В., Андреев Н. Е.* Влияние синхротронного излучения на динамику прецессии спина электрона в процессе лазерно-плазменного ускорения //Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – №. 4. – С. 291-294.

4. *Пугачёва Д. В., Андреев Н. Е.* О лазерно-плазменном ускорении поляризованных электронов до энергий в несколько ТэВ //Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 9. – С. 826-832.

5. *Walker P. A., Pugacheva D. V., Andreev N. E. et al.* Horizon 2020 EuPRAXIA design study //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 874. – №. 1. – С. 012029.

6. Weikum M. K., Pugacheva D. V., Andreev N. E. et al. EuPRAXIA—a compact, cost-efficient particle and radiation source //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Т. 2160. – №. 1. – С. 040012.
7. Weikum M. K., Pugacheva D. V., Andreev N. E. et al. Status of the Horizon 2020 EuPRAXIA conceptual design study //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1350. – №. 1. – С. 012059.
8. Assmann R. W., Pugacheva D. V., Andreev N. E. et al. EuPRAXIA conceptual design report //The European Physical Journal Special Topics. – 2020. – Т. 229. – №. 24. – С. 3675-4284.
9. Пугачёва Д. В., Андреев Н. Е. Динамика характеристик электронных и позитронных пучков в лазерно-плазменном ускорителе //Вестник Объединенного института высоких температур. – 2020. – Т. 5. – №. 2. – С. 13-17

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования "Сколковский институт науки и технологий"** (доцент Центра по технологиям искусственного интеллекта PhD С.Г.Рыкованов) – отзыв положительный, с замечаниями:

- недостатком работы является узкий диапазон параметров, используемых при моделировании динамики кильватерного поля лазерного импульса. Отсутствуют оценки допустимого отклонения от используемых параметров лазерного импульса и плазмы, позволяющие понять, в каком случае справедливы полученные в работе результаты и выводы.

- на рис. 5 не хватает сравнения со случаем ввода и вывода пучка в ускорительную секцию с резкой границей плазмы.

- отсутствует явное определение эмиттанса сгустка.

2. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук»** (главный научный сотрудник лаборатории 5-12 д.ф.-м.н., профессор РАН Лотов К.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский университет «МИФИ»** (д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической ядерной физики Института лазерных и плазменных технологий Попруженко С.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

4. **Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»** (старший научный сотрудник подразделения №171 — лаборатории компьютерного материаловедения Центра фундаментальных и прикладных исследований, к.ф.-м.н. Дьячков С.А.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- отсутствие сведений об используемых методах и схемах численного решения.

- для некоторых численных расчетов, описывающих динамику деполяризации, не хватает сопоставления с аналитическими результатами.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н. Костюков И.Ю. является ведущим ученым в области физики плазмы и лазерной физики, автор более 180 научных работ с результатами исследований сильно нелинейного режима взаимодействия лазерного излучения с плазмой, процесса самоинжекции и последующего ускорения электронов в самоорганизующихся лазерно-плазменных структурах, модели генерации электронами бетатронного излучения при лазерно-плазменном ускорении и анализа квантовых процессов, возникающих при взаимодействии сверхсильных электромагнитных полей с веществом:

1. Serebryakov D. A., Kostyukov I. Y. Piecewise acceleration of electrons across a periodic solid-state structure irradiated by intense laser pulse //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. –

Т. 62. – №. 10. – С. 104002.

2. *Pukhov A., Golovanov A., Kostyukov I.* Efficient Narrow-Band Terahertz Radiation from Electrostatic Wakefields in Nonuniform Plasmas //Physical review letters. – 2021. – Т. 127. – №. 17. – С. 175001.

3. *Samsonov A. S., Nerush E. N., Kostyukov I. Y., Filipovic M., Baumann C., Pukhov A.* Beamstrahlung-enhanced disruption in beam–beam interaction //New Journal of Physics. – 2021. – Т. 23. – №. 10. – С. 103040.

- к.ф.-м.н. Бочкарев Сергей Геннадьевич является высококвалифицированным специалистом по ускорению заряженных частиц, а именно электронов и ионов, при воздействии лазерных импульсов на плазму, автор работ по исследованию явлений неклассического переноса в столкновительной плазме:

1. *Naseri N., Bochkarev S. G., Ruan P., Bychenkov V. Yu., Khudik V., Shvets G.* Growth and propagation of self-generated magnetic dipole vortices in collisionless shocks produced by interpenetrating plasmas //Physics of Plasmas. – 2018. – Т. 25. – №. 1. – С. 012118.

2. *Ковалев В. Ф., Бочкарев С. Г., Быченко В. Ю.* Радиальное ускорение ионов при адиабатическом разлете многокомпонентной цилиндрической плазмы //Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 11. – С. 1023-1030.

3. *Вайс О. Е., Бочкарев С. Г., Тер-Аветисян С., Быченко В. Ю.* Об угловом распределении напрямую ускоренных электронов под действием мощного остророфокусированного лазерного импульса //Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 1. – С. 38-41.

- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» является одним из крупнейших российских научных центров. Лаборатория релятивистской лазерной плазмы кафедры общей физики и волновых процессов специализируется на проведении исследований взаимодействия мощных потоков энергии с веществом, в том числе взаимодействия излучения релятивистской интенсивности с плазмой. В лаборатории проводятся как численные, так и экспериментальные исследования по ускорению электронов и ионов в плотной плазме с использованием фемтосекундной лазерной системы с тераваттной пиковой мощностью:

1. *Tsymbalov I., Gorlova D., Ivanov K., et al.* Efficient electron injection by hybrid parametric instability and forward direct laser acceleration in subcritical plasma //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Т. 63. – №. 2. – С. 022001.

2. *Ivanov K. A., Gavrilin I. M., Volkov R. V., Gavrilov S. A., Savel'Ev A. B.* Thicket high Z wavelength-scale structured target: advantages and limitations for laser-driven hard x-ray source and phase contrast imaging //Laser Physics Letters. – 2021. – Т. 18. – №. 7. – С. 075401.

3. *Иванов К. А., Мордвинцев И. М., Каргина Ю. В., и др.* Генерация рентгеновского излучения и ускорение заряженных частиц при воздействии мощного фемтосекундного лазерного импульса на массив микро-и наностолбиков //Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 6. – С. 536-543.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

- предложена модель, позволяющая самосогласовано рассчитывать динамику ускорения и спиновой поляризации электрона в кильватерном поле, генерируемом в плазменном канале мощным фемтосекундным лазерным импульсом;
- обнаружен эффект укорочения ускорительной фазы кильватерного поля и максимального прироста энергии для позитронов по сравнению с электронами для характерных параметров умеренно нелинейного режима лазерно-плазменного ускорения;
- проанализирован основной механизм роста слайсового эмиттанта сгустка электронов для характерных параметров умеренно нелинейного режима ускорения, показано, что

основной вклад в рост эмиттанса вносит влияние нелинейной зависимости фокусирующей силы от радиуса, определены ограничения на амплитуду колебаний среднеквадратичного радиуса сгустка для минимизации влияния этого фактора;

- получен способ минимизации деполяризации электронного сгустка при вводе в ускорительную стадию и выводе из неё;
- обнаружен эффект уменьшения деполяризации электрона в процессе сильно нелинейного режима лазерно-плазменного ускорения до нескольких ТэВ при учете силы радиационного трения и отсутствие этого эффекта при умеренно нелинейном режиме ускорения;
- показано отсутствие влияния эффекта Соколова — Тернова на процесс деполяризации электрона при лазерно-плазменном ускорении до энергии в несколько ТэВ как для сильно нелинейного, так и для умеренно нелинейного режимов, несмотря на то что характерное время радиационной поляризации для электрона в кильватерных полях оказывается на несколько порядков меньше времени ускорения частицы.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

- получена аналитическая формула, позволяющая описывать прецессию спина релятивистского электрона при малых энергиях;
- показаны отличия в наборе энергии, деполяризации и росте эмиттанса для электронных и позитронных сгустков при линейном и умеренно нелинейном режимах лазерно-плазменного ускорения;
- определен основной механизм роста эмиттанса электронного сгустка при умеренно нелинейном режиме лазерно-плазменного ускорения и предложены ограничения на начальные параметры сгустка, позволяющие минимизировать рост эмиттанса;
- определена динамика поляризации сгустка электронов при вводе пучка в ускорительную стадию и выводе из неё;
- показано влияние силы радиационного трения и эффекта радиационной поляризации на эволюцию характеристик поляризованных частиц в модельных полях, характерных для умеренно нелинейного и сильно нелинейного режимов лазерно-плазменного ускорения.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

- результаты исследования условий согласования параметров электронных сгустков с полями лазерно-плазменного ускорителя и способов ввода частиц в ускорительную стадию и вывода из нее могут быть использованы при реализации различных международных проектов (таких как EuPRAXIA), нацеленных на получение высокоэнергетических пучков заряженных частиц высокого качества;
- результаты исследования процесса ускорения поляризованных электронов и позитронов в лазерно-плазменном ускорителе могут быть использованы при планировании экспериментов по физике высоких энергий на коллайдерах нового типа.
- оценки влияния синхротронного излучения на динамику лазерно-плазменного ускорения поляризованного электрона в различных режимах могут быть использованы при выборе оптимального режима ускорения на будущих установках, где планируется получать частицы с энергией в ТэВ-диапазоне.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, российских и международных проектах, в которых проводятся исследования по генерации с помощью лазерно-плазменных ускорителей ультрарелятивистских электронных и позитронных поляризованных сгустков высокого качества, в частности, в Объединенном институте высоких температур РАН, Институте прикладной физики РАН, Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Физическом институте имени П. Н. Лебедева РАН, Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, в российском проекте XCELS, международных

проектах FACET и EuPRACTIA.

**Оценка достоверности результатов** исследования выявила, что достоверность сделанных выводов и научных положений подтверждается хорошим согласием аналитических и численных результатов. Полученные результаты не противоречат существующим исследованиям и представлениям.

**Личный вклад соискателя** состоит в разработке блоков гибридного кода, сочетающего в себе отдельные модули с гидродинамическим подходом для описания взаимодействия лазерного импульса с плазмой и сеточными методами для описания динамики характеристик частиц. Автором были сформулированы аналитические модели, проведены вычислительные эксперименты и сделан анализ полученных результатов.

Апробация результатов исследования проводилась на 18 российских и международных конференциях. Основные публикации по выполненной работе подготовлены при определяющем участии автора.

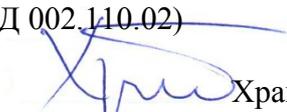
В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Соискатель Пугачева Дарья Валерьевна согласилась с рядом технических замечаний и ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы, приведя собственную аргументацию и обоснования.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 22.12.2021г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, новые научно обоснованные технические, технологические, решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, присудить Пугачевой Дарье Валерьевне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них очно: 10 докторов наук (6 - по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 4 по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), дистанционно: 10 докторов наук (5- по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 - по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

И.О. Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)  
д.ф.-м.н., профессор

 Храпак А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)  
д.ф.-м.н.

 Васильев М.М.

22.12.2021г.

