

## ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию Склярова Владислава Фатыховича "Исследование эмиссии субмиллиметровых электромагнитных волн из плазмы при коллективной релаксации электронного пучка в многопобочной ловушке ГОЛ-3", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Скляров Владислав Фатыхович начал работу в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) на установке ГОЛ-3 в 2007 году, будучи студентом физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. В 2009 году он защитил квалификационную работу на соискание степени бакалавра по теме «Субмиллиметровая  $2\omega_p$ -радиометрия турбулентной плазмы на установке ГОЛ-3», а в 2011 году – магистерскую диссертацию с темой «Исследование релаксации релятивистского электронного пучка в плазме на установке ГОЛ-3 методами субмиллиметровой радиометрии». С 2011 по 2014 год Скляров В. Ф. продолжил работу в ИЯФ СО РАН, одновременно являясь аспирантом Новосибирского государственного технического университета. С 2007 по 2009 год работал в ИЯФ СО РАН в качестве лаборанта, с 2009 по 2014 г. – старший лаборант, с 2014 по 2017 г. – младший научный сотрудник, а с июля 2017 г. занимает должность научного сотрудника.

Экспериментальные исследования взаимодействия электронного пучка с плазмой, проводимые на установке ГОЛ-3, имеют огромное значение для работ по управляемому термоядерному синтезу, как с позиции нагрева плазмы до термоядерных температур, так и для введения в плазму дополнительного потенциала с целью управления рядом плазменных неустойчивостей. Также в процессе взаимодействия электронного пучка с плазмой происходит раскачка плазменных волн, которые в условиях ленгмюровской турбулентности могут приводить к генерации интенсивного электромагнитного излучения. В связи с этим, исследовательская деятельность Склярова В. Ф. по теме диссертации направленная на исследование эмиссии электромагнитного излучения, возникающего в процессе коллективной релаксации электронного пучка в плазме, находящейся в гофрированном магнитном поле является актуальной, и имеет большое фундаментальное значение.

В рамках исследований на установке ГОЛ-3 при непосредственном инициативном участии Склярова В. Ф. была создана и введена в эксплуатацию специально разработанная 4-канальная, а затем и 8-канальная радиометрическая диагностика, обеспечивающая обзорную регистрацию спектральной плотности излучения в диапазоне от 100 до 550 ГГц со спектральным разрешением  $35 \div 50$  ГГц. Им была отработана методика абсолютной калибровки этой диагностики. При помощи радиометрической диагностики в экспериментах по релаксации мощного релятивистского электронного пучка ( $\gamma_L = 3$ ) в плотной плазме ( $n_e \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) на установке ГОЛ-3 был получен ряд важных результатов о параметрах выходящего электромагнитного излучения. В частности, было установлено, что излучение преимущественно наблюдается вблизи верхнегибридной и удвоенной верхнегибридной плазменной частоты. Соответственно, наиболее вероятным механизмом генерации излучения вблизи верхнегибридной частоты является рассеяние верхнегибридных плазменных волн, раскаченных электронным пучком, на флуктуациях плотности плазмы, а вблизи удвоенной частоты – слияние двух волн. Косвенным свидетельством данной гипотезы также является тот факт, что излучению вблизи

верхнегибридной частоты является преимущественно продольно-поляризованным, а вблизи удвоенной верхнегибридной частоты – поперечно-поляризованным.

Также было установлено, что источник излучения находится внутри области плазмы, занятой электронным пучком. Проведенный анализ свойств и динамики выходящего из плазмы электромагнитного излучения дал сведения и о самом процессе релаксации. В частности, было обнаружено, что вся вспышка излучения представляет собой последовательность кратковременных всплесков электромагнитного излучения, причём частота появления всплесков излучения уменьшается со временем. На основании этих фактов Скляровым В.Ф. было предположено существование в плазме мелкомасштабных провалов плотности, которые формируются в плазме за счёт модуляционной неустойчивости. Данные области пространства с одной стороны являются источником электромагнитного излучения, а с другой приводят к дополнительному рассеянию частиц плазмы, что увеличивает эффективную частоту столкновений.

Помимо работ с релятивистским электронным пучком на установке ГОЛ-3 проводился цикл работ по инжекции 100-кэВ электронного пучка в плазму. В рамках данных работ Скляровым В. Ф. также было проведено исследование выходящего из плазмы электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. В частности, было установлено, что излучение, в этом случае, происходит в окрестности верхнегибридной частоты и частоты близкой к удвоенной верхнегибридной. Однако, ключевым отличием является то, что спектр излучения является очень узким, а, следовательно, излучение имеет длину когерентности сравнимую с размером плазменного шнура. Как следствие это указывает на тот факт, что регистрируемое излучение может быть связано с тем, что в данной пучково-плазменной системе возможна реализация т. н. мазерного механизма генерации. Одним из наиболее ярких результатов данного цикла работ стала демонстрация возможности энергоэффективного преобразования энергии электронов пучка в электромагнитные волны, и при параметрах эксперимента: энергия электронов пучка 100 кэВ ( $\gamma_L \approx 1,2$ ); плотность плазмы  $n_e \approx 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; ток пучка  $I \approx 25 \div 30 \text{ А}$ ; величина ведущего магнитного поля  $B \approx 1 \text{ Тл}$ , яркость источника достигает величины  $\sim 0,5 \text{ кВт} / (\text{ср} \cdot \text{см}^{-3})$ , что соответствует КПД  $\sim 4 \%$  по отношению к полной энергии пучка.

Полученные Скляровым В.Ф. экспериментальные результаты являются уникальными и содержат важную физическую информацию, необходимую как для повышения эффективности нагрева и удержания плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3, так и для развития незавершённых на настоящий момент теоретических моделей горячей замагниченной плазмы с развитой ленгмюровской турбулентностью.

Наряду с научной деятельностью Скляров В. Ф. ведёт активную преподавательскую работу на кафедре общей физики Новосибирского государственного университета, где с 2014 по 2016 год преподавал практические занятия по курсу "Механика и теория относительности" студентам физического и геолого-физического факультетов, а с 2017 г. ведёт лабораторные работы по курсу "Атомный практикум".

Всего Скляровым В. Ф. опубликовано в соавторстве двадцать три научных работы в рецензируемых научных журналах (в том числе пятнадцать – по теме диссертации). С 2014 по 2015 г. Скляров В. Ф. являлся руководителем гранта РФФИ "Экспериментальное изучение эмиссии суб-ТГц электромагнитного излучения при нагреве плазмы электронным пучком".

Представленные в диссертации результаты прошли апробацию на семинарах и международных конференциях.

Вклад соискателя в работы по теме диссертации является определяющим. Считаю, что представленная диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, а сам Скляров В. Ф. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.08 – физика плазмы.

Научный руководитель:



д.ф.-м.н. Бурдаков А. В.

Учёный секретарь института:



к.ф.-м.н. Ракшун Я. В.

14 сентября 2017 г.