

УДК 533.9.01

Ионно-звуковая турбулентность в голове страты гелий-неонового тлеющего разряда

Козырев Александр Валентинович

kozykryl@gmail.com

SPIN-код: 9512-5868

Волк Роман Васильевич

roma_volk_2004@mail.ru

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты численного исследования феномена возникновения турбулентности в голове страты, а также проведения экспериментов на установке «Плазма-2» с аномальным He-Ne разрядом. Физической картиной, описывающей переносные явления, в частности, диффузионные потоки, которые также изучаются на этой установке, является модель, когда в голове страты развивается ионно-звуковая турбулентность, приводящая к возникновению эффекта аномальной диффузии. Для описания этого состояния использовалось уравнение типа Фоккера — Планка. Приведены численные результаты отладки модели водородной плазмы, ориентированной на исследование He-Ne плазмы тлеющего разряда. Результаты показывают, что функция распределения электронов в голове страты испытывает более высокую степень бунчировки. Все характеристики в голове страты определялись с учетом ионно-звуковой турбулентности. Результаты, которые в настоящее время получены для водородной плазмы, показывают, что при формировании теории необходимо учитывать эффект турбулентности плазмы в голове страты.

Ключевые слова: турбулентность плазмы, голова страты, аномальный He-Ne разряд, ионно-звуковая турбулентность, уравнение типа Фоккера — Планка, бунчировка функции распределения электронов

Ion-sound turbulence in the head of the helium-neon glow discharge stratum

Kozyrev Alexander Valentinovich

kozykryl@gmail.com

SPIN-code: 9512-5868

Volk Roman Vasilievich

roma_volk_2004@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents the results of a numerical study of the phenomenon of turbulence in the head of the stratum, as well as experiments conducted at the Plasma 2 installation with an abnormal He-Ne discharge. The physical model describing portable phenomena, in particular, diffusion flows, which are also studied at this facility, is a model when ion-sound turbulence develops in the head of the stratum, leading to the appearance of an anomalous diffusion effect. The Fokker-Planck type equation was used to describe this state. The paper presents numerical results of debugging a hydrogen plasma model focused on the study of glow discharge He-Ne plasma. The results show that the electron distribution function in the head of the stratum experiences a higher degree of bunching. All the characteristics in the head of the stratum were determined taking into account ion-sound turbulence. The results

currently obtained for hydrogen plasma show that when forming the theory, it is necessary to take into account the effect of plasma turbulence in the stratum head.

Keywords: plasma turbulence, stratum head, anomalous He-Ne discharge, ion-sonic turbulence, Fokker-Planck type equation, bunching of the electron distribution function

Введение. При протекании электрического тока в разряженном газе с напряжением в сотни вольт под воздействием внешних полей при ионизации возникает плазменный столб. Существует две формы положительного столба газового разряда: однородный и слоистый [1, 2].

В работе рассматривается слоистый столб — стратифицированный. Возникновение стратификации разряда положительного столба в газе является наиболее легко наблюдаемым типом волн в плазме.

Под местом зарождения страт (область падения потенциала у катода) понимают крутой подъем потенциала в пространстве между анодом и катодом, а также локальное повышение концентрации электронов и ионов. При удалении от головной части страты быстрые электроны в результате неупругих столкновений теряют свою скорость, и ионизация происходит реже. Электроны и положительные ионы существуют в основном за счет диффузии. Разрядный ток здесь представлен диффузионным током электронов в сторону анода [3, 4].

В установке «Плазма-2» [5, 6] существуют электрические зонды, которые при малом изменении параметров разряда могут попадать в голову или хвост страты. Когда зонд находится в голове страты, возникают флуктуации тока насыщения в районе сотен мегагерц, что соответствует ионно-звуковой плазменным частотам исследуемого аномального He-Ne тлеющего разряда (рис. 1).

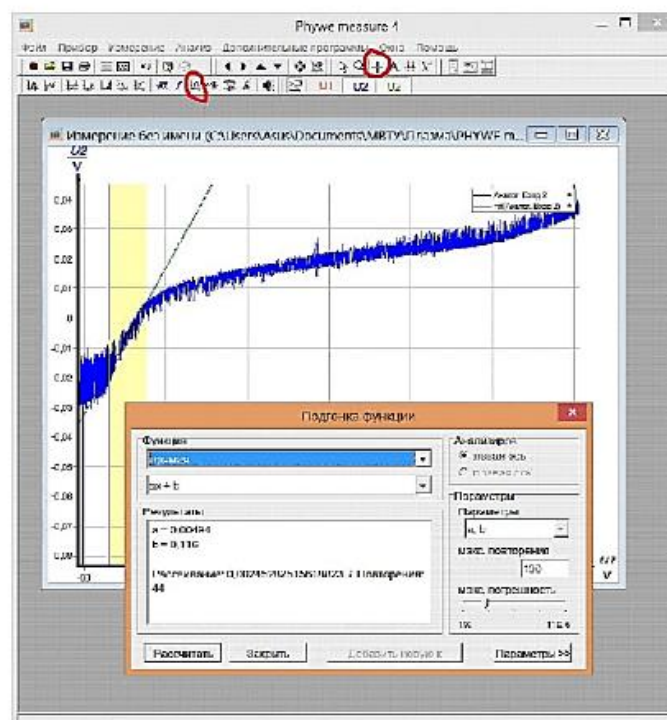


Рис. 1. Флуктуация тока насыщения двойного зонда [7]

В работах В.С. Голубовского [8] и Л.Д. Цендлина [9] разработана теория стратификации, основанная на развитии ионизационной неустойчивости в страте. Для описания функции распределения электронов (ФРЭ) в страте было используется уравнение типа Фоккера — Планка [10]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{2w^{\frac{3}{2}}}{3m\nu} \frac{\partial f_0}{\partial x} + v_g \sqrt{w} \frac{\partial f_0}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[2 \frac{m}{M} \nu w^{\frac{3}{2}} \left(f_0 + T_a \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[2 \nu_e w^{\frac{3}{2}} \left(A_1 f_0 + A_2 \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) \right] = 2 \sqrt{w} \gamma f_0,$$

где f_0 — ФРЭ; ν — частота упругих столкновений; w — кинетическая энергия; m — масса электрона; M — масса атома; T_a — температура максвелловского распределения нейтральных атомов; v_g — групповая скорость пучка электронов; γ — инкремент ионно-звуковой неустойчивости. В этом уравнении правая часть была взята так, что она учитывает раскачку ионно-звуковой неустойчивости с инкрементом γ , приводящей к ионно-звуковой турбулентности в голове страты, что наблюдается в экспериментах водородной стратифицированной плазмы в виде стохастических флуктуаций концентрации электронов. Колебания находятся в диапазоне сотен мегагерц, что соответствует ионной плазменной частоте в плазме установки «Плазма-1». Поэтому правая часть определяется инкрементом нарастания ионно-звуковой турбулентности [11–13].

Материалы и методы. При решении дифференциального уравнения типа Фоккера — Планка для водорода были использованы конечно-разностный метод, метод прогонки и метод численного интегрирования. Для построения ФРЭ была составлена программа на языке программирования СИ в программе MatLab, отладку которой проводил Л.Е. Спиридонов для случая водородной плазмы.

Результаты. С помощью компиляционной программы MatLab были построены графики ФРЭ по энергии электронов (рис. 2).

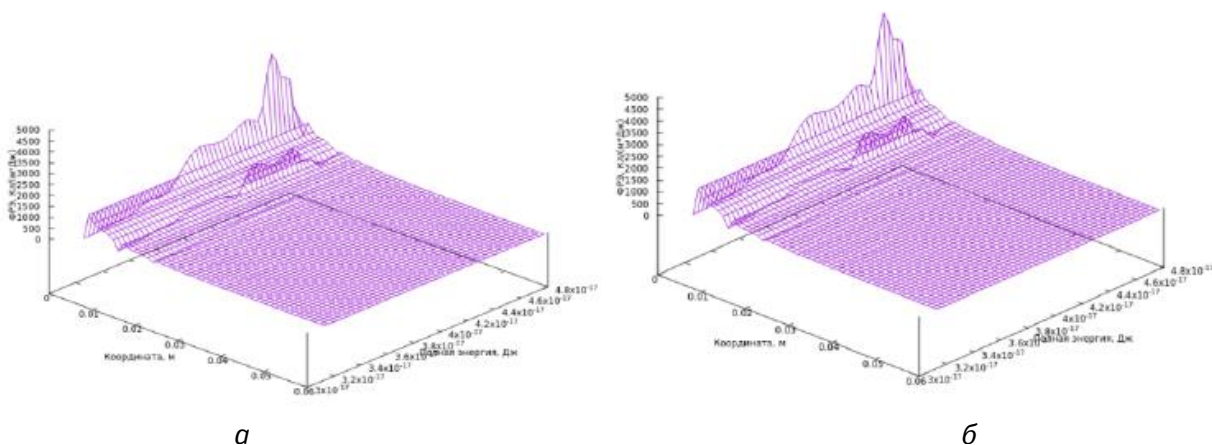


Рис. 2. ФРЭ без учета ионно-звуковой турбулентности (а) и с учетом ионно-звуковой турбулентности (б)

На рис. 3 приведен график наложения ФРЭ с ионно-звуковой турбулентности и без. На рис. 4 — разность между ФРЭ с ионно-звуковой турбулентностью (ИЗТ) и без.

Наличие двух горбов у ФРЭ от полной энергии определяет проводимость плазмы (рис. 5).

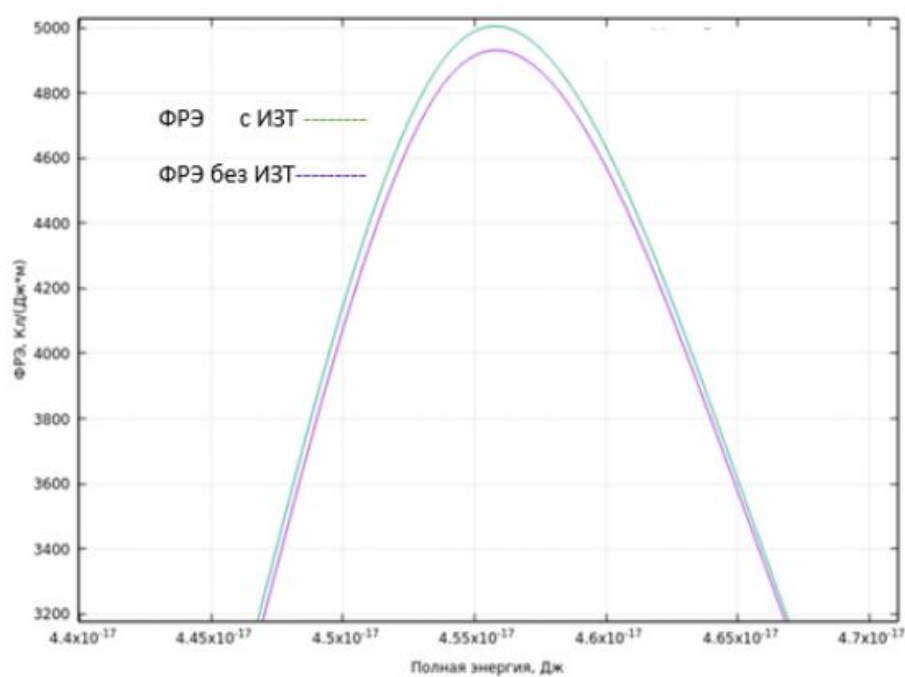


Рис. 3. Наложение ФРЭ в голове страты

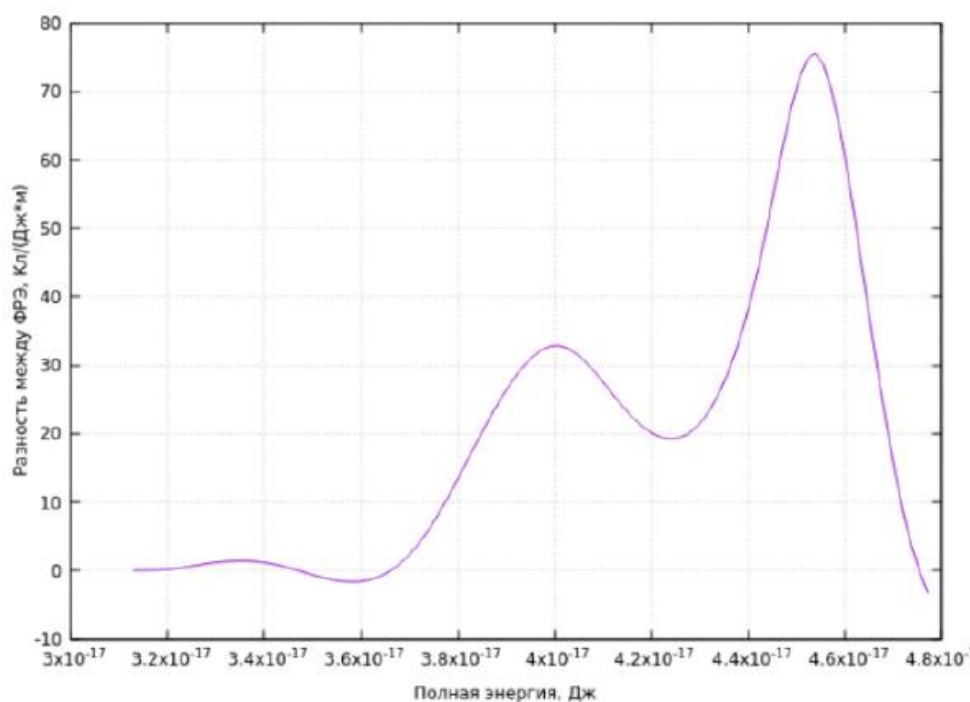


Рис. 4. Разность между ФРЭ с учетом и без учета ионно-звуковой турбулентности в голове страты

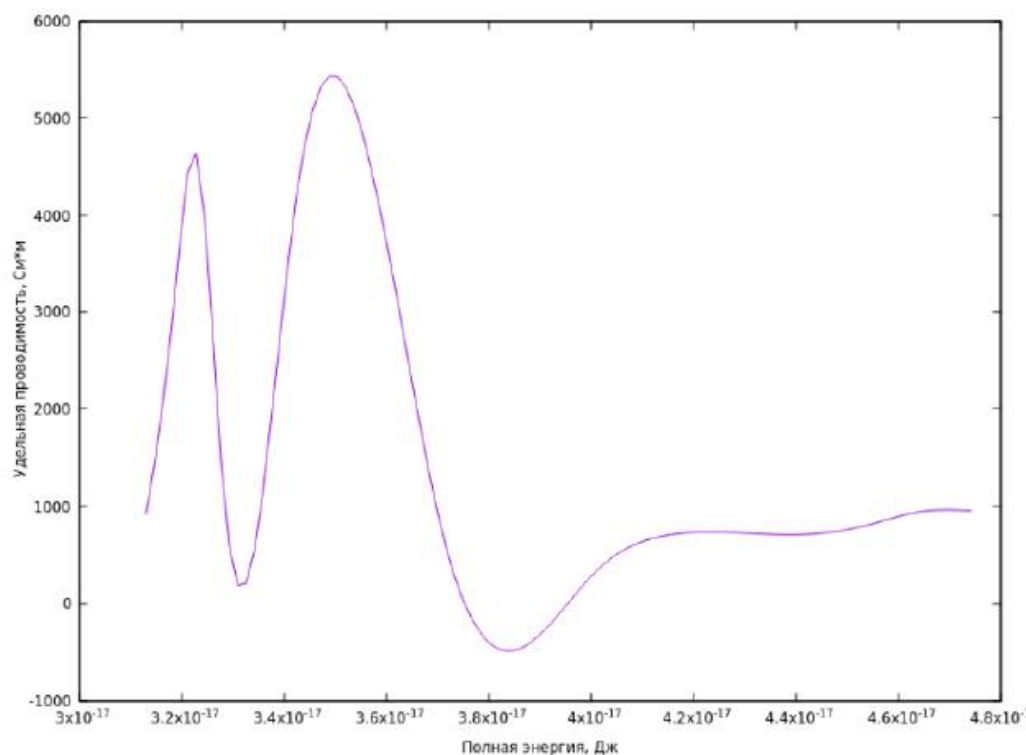


Рис. 5. Проводимость плазмы в голове страты

Обсуждение полученных результатов. ФРЭ в голове страты с учетом ионно-звуковой турбулентности бунчируется (т. е. «сжимается» по оси энергий) в большей мере, чем без учета ионно-звуковой турбулентности, а также вторая страта меньше подвержена бунчировке (рис. 1).

При больших энергиях разность между ФРЭ с учетом ионно-звуковой турбулентности и без учета ионно-звуковой турбулентности более существенна. Следовательно, по данной модели влияние ионно-звуковой турбулентности более значительно на больших энергиях. Из сравнения графиков ФРЭ и проводимости следует, что электроны распределяются по энергии неравномерно из-за перепадов проводимости, которая обратно пропорционально инкременту ионно-звуковой неустойчивости, при этом имеет место эффект аномальной проводимости [14].

Заключение. Для описания турбулентности в голове страты тлеющего разряда водородной плазмы было произведено статистическое исследование уравнения типа Фоккера — Планка для одномерного случая с измененной правой частью, учитывающей ионно-звуковую турбулентность. Построены и проанализированы графики ФРЭ с учетом инкремента ионно-звуковой турбулентности и без.

Дальнейшие исследования турбулентности плазмы в голове страты связаны с изучением стратификации аномального He-Ne тлеющего разряда, а также расширение теории стратификации для магнитоактивной плазмы путем модификации уравнения типа Фоккера — Планка.

Список источников

- [1] Кролл Н., Трайвелпис А. *Основы физики плазмы*. Москва, Мир, 1975, 526 с.
- [2] Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. Москва, Наука, 1992, 536 с.
- [3] Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. *Основа физики плазмы*. Москва, Атомиздат, 1977, 384 с.
- [4] Ишимару С. *Основные принципы физики плазмы*. Москва, Атомиздат, 1975, 288 с.
- [5] Козырев А.В., Айрапетянц А.В. Влияние ионно-звуковой турбулентности на магнитную изоляцию плоского зонда в аномальном тлеющем разряде. *Будущее машиностроения России. XVIII Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с междунар. уч.): сб. докл. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026, т. 2, с. 607–612.*
- [6] Козырев А.В., Ланцов А.В. Исследование газоразрядной стратифицированной плазмы с использованием среды Phywe Measure. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 3 (39), с.1–11. <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2015-3-1381>
- [7] Козырев А.В., Шиббаева А.Д. Лабораторная работа «Зондовый метод диагностики плазмы». *Физическое образование в вузах*, 2021, т. 27, № 1, с. 41–49.
- [8] Голубовский Ю.Б., Некучаев В.О., Скобло А.Ю. Прогресс в исследовании страт в инертных газах. *Журнал технической физики*, 2014, т. 84, № 12, с. 50–62.
- [9] Цендин Л.Д. Нелокальная кинетика электронов в газоразрядной плазме. *Успехи физических наук*, 2010, т. 180, № 2, с. 139–164.
- [10] Голубовский Ю.Б., Некучаев В.С., Понамарёв Н.С. Запертые и свободные электроны в прианодной области стратифицированного разряда. *Журнал технической физики*, 1998, т. 68, № 3, с. 25–32.
- [11] Цытович В.Н. *Теория турбулентности плазмы*. Москва, Атомиздат, 1971, 422 с.
- [12] Каплан С.А., Цытович В.Н. *Плазменная астрофизика*. Москва, Наука, 1972, 440 с.
- [13] Кадомцев Б.Б. *Коллективные явления в плазме*. Москва, Наука, 1988, 304 с.
- [14] Завойский Е.К., Рудаков Л.И. Турбулентный нагрев плазмы. *Атомная энергия*, 1967, т. 32, вып. 5, с. 417–431.