

УДК 533.938

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ

А. П. Мезенцев, А. С. Мустафаев, В. Л. Федоров

Измерена функция распределения электронов по скоростям плоским односторонним зондом на оси плазменного промежутка положительного столба гелиевого разряда в диапазоне давлений 0.2—1 Тор и разрядных токов 50—500 мА. Определены моменты функции распределения электронов по скоростям, а на основе этого — конвективная скорость электронов в различных режимах разряда. Показано, что в зависимости от разрядных условий конвективная скорость определяется либо парными упругими столкновениями электронов с атомами, либо коллективными процессами межэлектронных столкновений.

Введение

Конвективная скорость электронов, возникающая в плазме за счет воздействия электрического поля или за счет градиента концентрации электронов, определяет многие электрические параметры плазмы.

Формирование конвективной скорости происходит в результате столкновительных процессов, идущих с участием электрона и в результате коллективных взаимодействий между заряженными компонентами плазмы. Поэтому экспериментальное определение конвективной скорости электронов позволяет исследовать относительную интенсивность этих процессов, и если один из этих процессов при конкретных плазменных условиях доминирует, то оказывается возможным раздельное их изучение.

В настоящей работе на примере исследования положительного столба электрического разряда в гелии показывается, что при определенных условиях может быть реализован столкновительный механизм формирования конвективной скорости электронов. В то же время в положительном столбе разряда могут быть созданы такие условия, когда доминирующими являются коллективные взаимодействия.

Рассмотрим плазму положительного столба в разрядной трубке круглого сечения. Протекание тока через разрядную трубку вызывает асимметрию функции распределения электронов по скоростям, которая для приосевой области разрядной трубки описывается рядом Лежандра

$$f(z, v) = \sum_{j=0}^{\infty} f_j(z, v) P_j(\cos \theta), \quad (1)$$

где z — координата, отсчитанная по направлению оси разрядной трубки; v — скорость электронов; θ — угол между направлением скорости электрона и осью разрядной трубки; $P_j(\cos \theta)$ — полином Лежандра.

Лежандровы компоненты функции распределения f_j могут быть экспериментально определены за счет измерений, выполненных с помощью плоского одностороннего зонда при ряде ориентаций его в плазме [1, 2].

Лежандров компонент f_0 функции распределения ответствен за распределение электронов по модулю скорости. Лежандров компонент f_1 определяет асим-

метрию функции распределения и ответив на усредненную по направлениям движения конвективную скорость электронов [3]

$$\langle v_z \rangle_{\text{конв}} = \frac{1}{3} \frac{vf_1}{f_0}. \quad (2)$$

Плотность электронного разрядного тока также определяется лежандровым компонентом f_1 функции распределения

$$j = \frac{4\pi}{3} e \int_0^{\infty} v^3 f_1 dv. \quad (3)$$

Если плазма положительного столба электрического разряда однородна вдоль оси разрядной трубки (что, как правило, выполняется) и доминирующим механизмом в установлении стационарной функции распределения электронов по скоростям являются парные столкновительные процессы, то лежандровы компоненты f_0 и f_1 оказываются связанными между собой достаточно простой зависимостью

$$f_1 = \frac{eE_x}{m\nu} \frac{df_0}{dv}, \quad (4)$$

где ν — транспортная частота столкновений, m — масса электрона, E_x — напряженность электрического поля на оси разрядной трубки.

Анализ формул (2)–(4) показывает, что лежандровые компоненты f_0 и f_1 функции распределения электронов по скоростям позволяют определить не только конвективную скорость электронов, но и оценить роль парных столкновительных процессов в формировании функции распределения.

Экспериментальная установка и методика измерений

Измерения проводились в разрядной трубке круглого сечения диаметром 3 см. Электрический разряд создавался между плоским импрегнированным подогретым катодом диаметром 1 см и плоским анодом диаметром 2 см. Общая длина разрядного промежутка 40 см. Трубка заполнялась спектрально-чистым гелием, давление которого изменялось в пределах от 10^{-1} до 1 Тор. Давление остаточных газов поддерживалось на уровне менее 10^{-8} Тор, что достигалось длительной тренировкой разрядной трубки. Принятые в эксперименте меры по стабилизации условий электрического разряда обеспечивали воспроизводимость результатов не хуже 0.5 %. Отношение сигнал / шум во всех проведенных экспериментах было не менее 200.

Во время измерений контролировались колебания разрядного тока и падения напряжения на разрядном промежутке в частотном интервале 0–50 МГц. Вариации разрядного тока не превышали 1 мА при токе 500 мА, вариации падения напряжения на разрядном промежутке не превышали при этом $\pm 10^{-1}$ В. Измерения проводились с помощью плоского одностороннего зонда диаметром 0.8 мм. Специальная дистанционная система позволяла изменять угловую ориентацию зонда по отношению к направлению оси разрядной трубки в пределах 0–180°. Погрешность начальной установки зонда составляла $\pm 0.5^\circ$. Перемещение зонда вдоль оси разрядной трубки осуществлялось с погрешностью установки, не превышающей 0.01 мм.

Регистрировались вторые производные от зондового тока по потенциалу зонда I''_v при дискретных ориентациях нормали поверхности зонда по отношению к оси разрядной трубки, соответствующих углам 0, 45, 90, 135, 180°.

Измерения проводились методом модуляционного дифференцирования [4, 5]. Лежандровы компоненты функции распределения электронов по скоростям определены с помощью методики, описанной в [6].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты измерения второй производной зондового тока по потенциалу зонда при давлении гелия 0.5 Тор, разрядном токе 0.5 А и углах ориентации плоскости зонда в диапазоне 0–180° представлены на рис. 1. Отметим тот

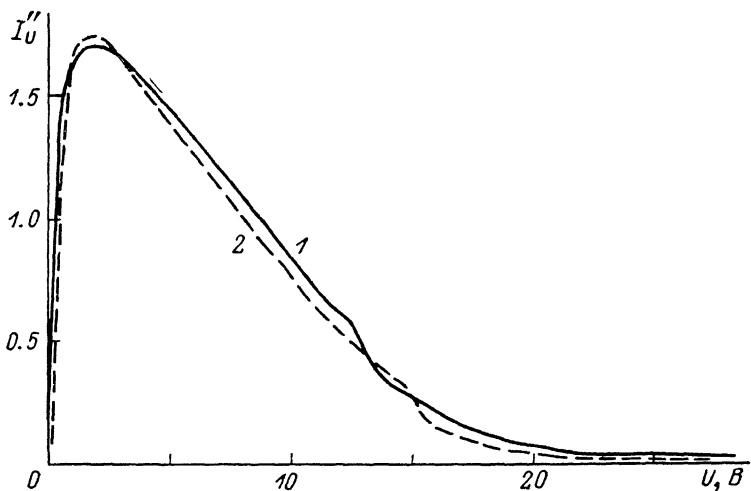


Рис. 1. Вторые производные зондового тока $I''_U(U, \varphi)$. $P_{\text{He}} = 0.5$ Тор, $I_A = 0.5$ А, $U_A = 113.6$ В, $z = 25$ см, $\varphi = 0$ (1) и 180° (2).

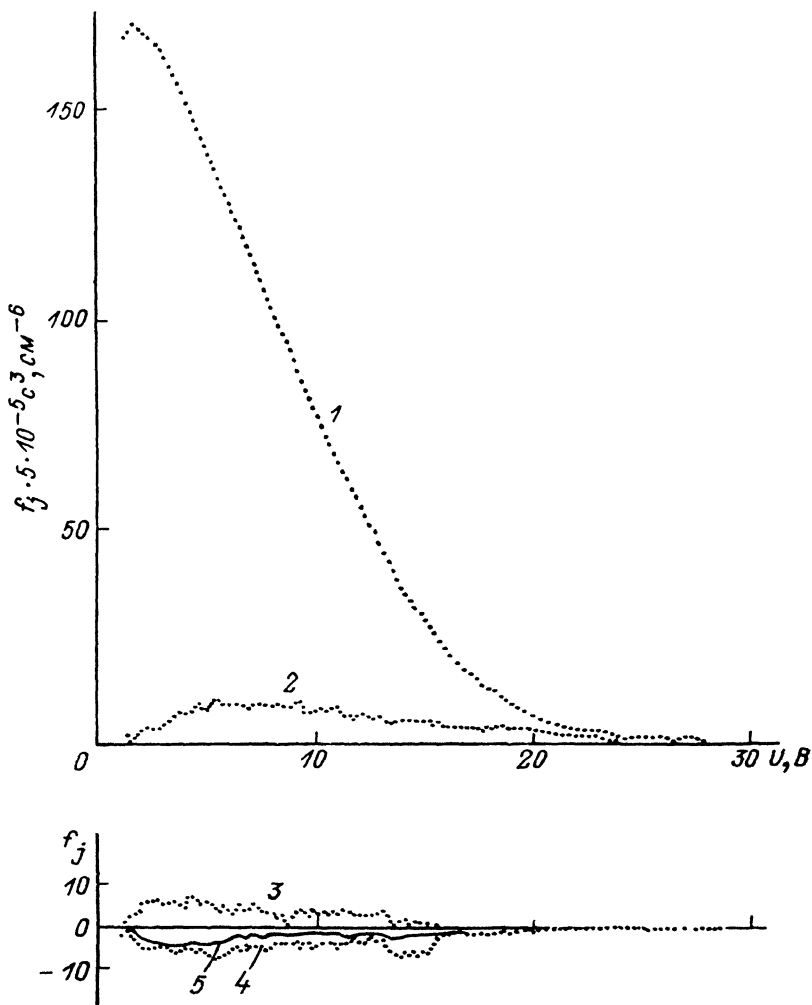


Рис. 2. Энергетическая зависимость лежандровых коэффициентов f_j , функции распределения электронов по скоростям f_0 (1), f_1 (2), f_2 (3), f_3 (4), f_4 (5).

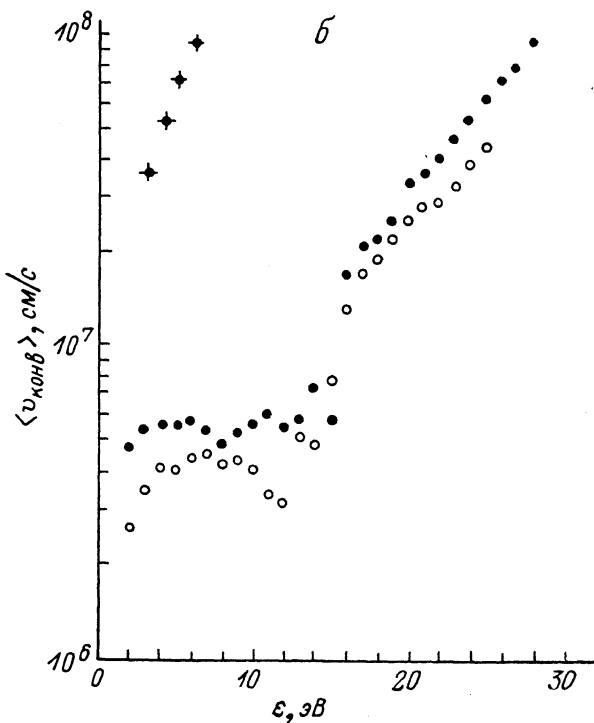
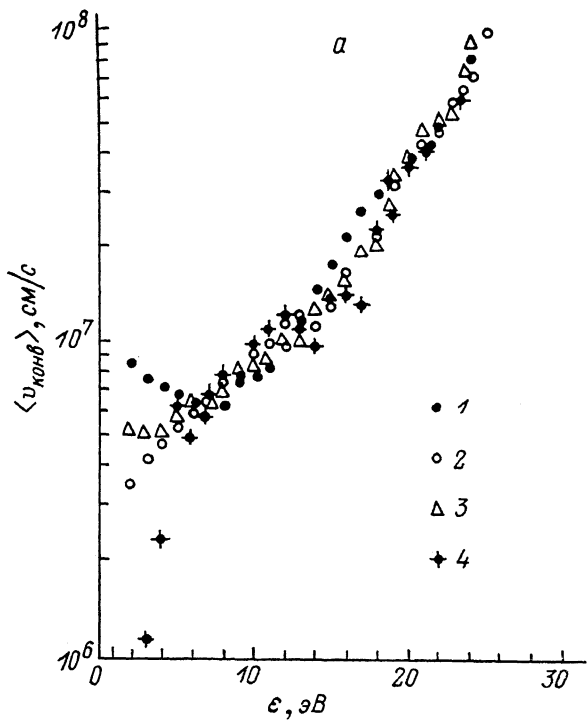


Рис. 3. Зависимость конвективной скорости от энергии электронов в плазме положительного столба гелиевого разряда для $P_{\text{He}}=0.5$ (а) и 0.2 Тор (б).

1, 2, 3 — расчет по (2) для разрядных токов 0.1, 0.25 и 0.5 А соответственно; 4 — расчет по (4).

факт, что зависимости I_{ν}'' мало отличаются друг от друга (различия не превышают 10 %), что является следствием малой анизотропии функции распределения электронов по скоростям. Определенные по измеренным значениям I_{ν}'' лежандровы компоненты функции распределения представлены на рис. 2. Численные значения лежандрова компонента f_1 значительно меньше соответствующих значений f_0 , а лежандров компонент f_2 с точностью до погрешности реконструкции можно положить равным нулю почти во всей области его экспериментального определения. Пренебрежимо малы также величины лежандровых компонент f_3, f_4 и т. д. Малость значений лежандровых компонент начиная с f_1 свидетельствует о высокой степени изотропности функции распределения электронов по скоростям в положительном столбе электрического разряда. С целью контроля точности определения лежандрова компонента функции

P, Тор.	I, мА	
	экспер.	расчет
1	590	565
	500	470
0.5	514	454
	236	258
	110	110
0.2	404	355
	252	240
	102	119
	50	52

распределения f_1 проводилось сравнение непосредственно измеренной величины разрядного тока со значением силы разрядного тока, вычисленного с использованием экспериментальных значений f_1 по соотношению (3). Результаты сравнения приведены в таблице.

Легко заметить, что рассчитанные и определенные, как было указано выше, значения разрядного тока отличаются друг от друга не более чем на 10 % для всех исследованных режимов разряда. Отметим также, что при расчете силы разрядного тока по соотношению (3) учитывалась зависимость концентрации

электронов от расстояния от оси трубки. Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений разрядного тока косвенно свидетельствует о достоверности определения лежандрова компонента f_1 функции распределения электронов по скоростям.

Определенные по соотношению (2) значения конвективной скорости электронов приведены на рис. 3, а, б. Там же приведены значения конвективной скорости электронов, полученные по соотношению (4), в котором использовались данные по транспортной частоте упругих электрон-атомных столкновений, приведенные в [7]. Легко заметить, что величина конвективной скорости не зависит от метода ее определения, если давление гелия равно 0.5 или 1.0 Тор. Для давления гелия 0.2 Тор наблюдаются существенные различия, выходящие за рамки погрешности измерений. Необходимо отметить также, что при давлениях гелия вблизи 0.2 Тор транспортная длина свободного пробега электронов для упругих электрон-атомных столкновений становится сравнимой с радиусом разрядной трубки. Наблюдаемые расхождения значений конвективной скорости электронов в этом режиме можно связать с влиянием коллективных межэлектронных взаимодействий, которые оказываются сравнимыми или даже более интенсивными, чем парные столкновительные процессы.

Заключение

Измерения, проведенные с помощью плоского одностороннего зонда в низкотемпературной плазме, позволяют определять конвективную скорость электронов. С другой стороны, конвективная скорость может быть рассчитана в предположении столкновительного механизма установления функции распределения электронов по скоростям. Сравнение величин конвективной скорости электронов, измеренных зондовым методом, с рассчитанными значениями показывает, что при давлениях гелия 0.5 Тор и выше в положительном столбе доминирует столкновительный механизм установления функции распределения электронов по скоростям. При давлении 0.2 Тор становятся существенными коллективные процессы межэлектронных взаимодействий.

Литература

- [1] Мезенцев А. П., Мустафаев А. С., Лапшин В. Ф., Федоров В. Л. ЖТФ, 1986, т. 56, № 11, с. 2104—2110.
- [2] Федоров В. Л. ЖТФ, 1985, т. 55, № 5, с. 926—929.
- [3] Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир, 1977. 672 с.
- [4] Мустафаев А. С., Мезенцев А. П., Симонов В. Я. и др. ЖТФ, 1984, т. 54, № 11, с. 2153—2157.
- [5] Малышев Г. М., Федоров В. Л. ДАН СССР, 1953, т. 93, с. 269—271.
- [6] Федоров В. Л., Мезенцев А. П. ЖТФ, 1987, т. 57, № 3, с. 595—597.
- [7] Киттар К. Phys. Rep., 1984, v. 112, N 5, p. 321—375.

Ленинградский горный институт
им. Г. В. Плеханова

Поступило в Редакцию
6 июля 1987 г.