

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В ПЛАЗМЕННОМ ШНУРЕ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК ТМ-3

Э.И.Кузнецов, Н.Д.Виноградова

В тороидальных установках типа Токамак взаимодействие частиц плазмы со стенками вакуумной камеры и диафрагмой приводит к поступлению в плазменный шнур потока нейтрального газа, сорбированного на стенках. В результате за счет процесса перезарядки горячих атомов водорода может происходить охлаждение плазмы. Для оценки энергии, уносимой перезарядившимися ионами водорода необходимо знать концентрацию нейтральных атомов водорода в плазменном шнуре. Концентрацию нейтральных атомов в плазменном шнуре можно определить из измерений абсолютных интенсивностей отдельных спектральных линий на основе ряда теоретических соображений, если наряду с заселенностью уровня для данной спектральной линии одновременно известны температура и концентрация электронов. Для водорода и водородоподобных атомов такие расчеты с учетом многоступенчатых процессов были выполнены в работах [1, 2], но для малых значений электронных температур. Для интервалов температур и концентраций электронов, получаемых на установках Токамак, аналогичные расчеты были выполнены В.А.Абрамовым, В.И.Коганом и Э.И.Кузнецовым. Используя эти данные, можно рассчитать концентрацию нейтральных атомов по измеренной интенсивности линий H_{α} и H_{β} .

Для определения концентрации нейтральных атомов водорода в плазменном шнуре на установке ТМ-3 [3] были проведены измерения абсолютных интенсивностей бальмеровских линий водорода H_{α} и H_{β} с одновременным измерением с помощью радиоинтерферометра концентрации электронов. Данные о температуре электронов брались из выполненных ранее измерений диамагнитного сигнала [4].

Измерения проводились в макроскопически устойчивых режимах разряда [5] при напряженностях магнитного поля от 9 до 24 кэ и величинах разрядного тока от 16 до 46 кА. Начальное давление водорода менялось от $4 \cdot 10^{-4}$ до $1,3 \cdot 10^{-3}$ тор. Давление остаточного газа в камере было порядка 10^{-7} тор. Длительность разряда равнялась 6 мсек.

Излучение, выходящее через кварцевое окошко в направлении большого радиуса тороидальной камеры со стороны противоположной той, где расположена диафрагма, регистрировалось с помощью калиброван-

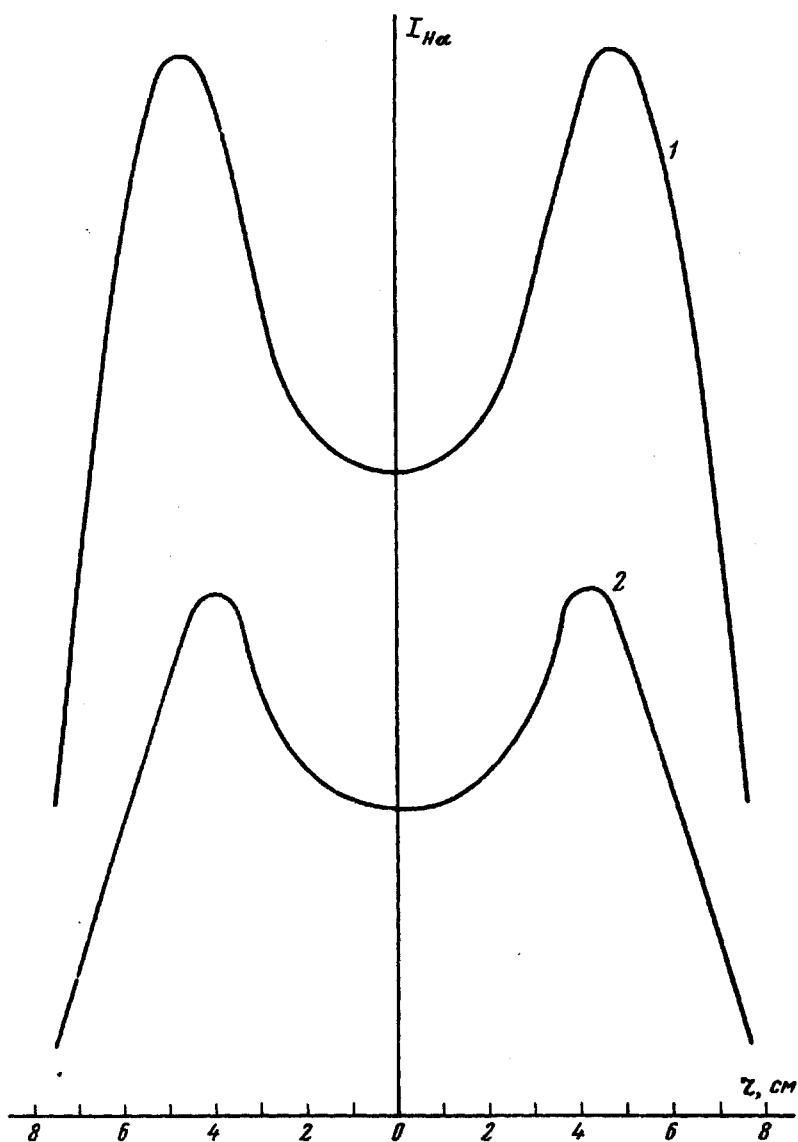


Рис.1. Распределение источников излучения в поперечном сечении плазменного шнура для бальмеровской линии H_{α} . Режим опыта: сила разрядного тока $I = 40$ ка, напряженность продольного магнитного поля $H_z = 24$ кэ, начальное давление $p_0 = 4,6 \cdot 10^{-4}$ тор. 1 – кривая для второй миллисекунды разряда; 2 – кривая для четвертой миллисекунды разряда

ной системы из монохроматора и фотоумножителя. Регистрация излучения осуществлялась с некоторого момента времени после максимума свечения, т.е. в тот период разряда, когда ионизация рабочего газа уже

завершена и излучение обусловлено потоком нейтрального газа, поступающего в плазменный шнур извне. В течение одного разряда регистрировалось излучение лишь одной из линий.

При вычислениях концентрации нейтральных атомов учитывались эффект отражения света от поверхности камеры и неравномерность интенсивности излучения в различных точках вдоль оси тороидальной камеры.

Из измерений профиля свечения линии H_{α} в поперечном сечении шнура в различные моменты разряда, выполненных по методу, описанному в работе [6], видно (рис. 1), что для второй миллисекунды интенсивность излучения в центре в несколько раз слабее, чем на периферии.

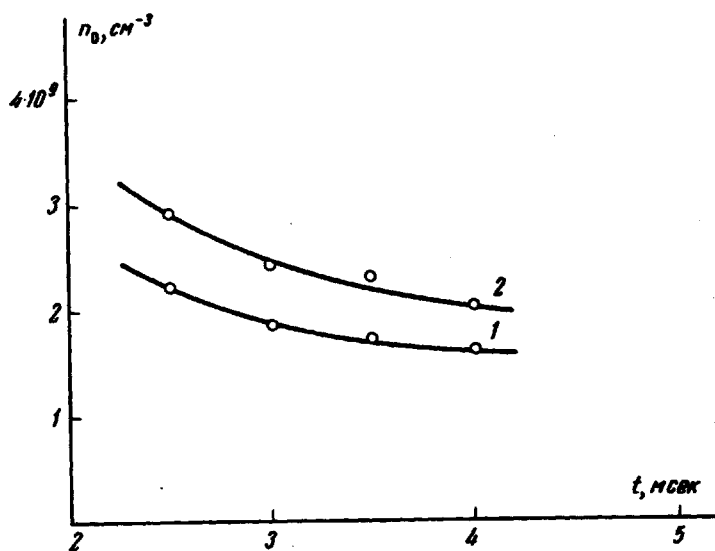


Рис.2. Изменение в процессе разряда среднего значения концентрации нейтральных атомов в плазменном шнуре. 1 – кривая для измерений по излучению линии H_{α} ; 2 – кривая для измерений по линии H_{β} . Режим опыта: $I = 40$ кА, $H_z = 24$ кэ, $p_0 = 4,6 \cdot 10^{-4}$ тор

В более поздние времена разряда распределение излучения выравнивается. На периферии плазменного шнура могут быть значительные градиенты концентрации и температуры электронов и точность расчетов для этой области мала. Однако, при любых разумных распределениях этих величин, например, по параболическому закону (для концентрации электронов это наблюдалось экспериментально [4]), для центральной области шнура температуру и концентрацию электронов можно считать строго заданными. Тогда концентрация нейтральных атомов в централь-

ной области шнура радиусом 5–6 см (радиус диафрагмы 8 см) может быть определена достаточно точно.

Теоретические расчеты заселенностей уровней водородных атомов позволяют определять концентрацию нейтральных атомов лишь с точностью до фактора равного двум. Поэтому при расчетах средней по сечению шнура концентрации нейтральных атомов можно использовать средние значения температуры и концентрации электронов и абсолютных интенсивностей. Получаемые при этом величины мало отличаются, в пределах точности расчетов, от средних концентраций нейтральных атомов, определенных с учетом наблюдаемого нами профиля свечения линий в поперечном сечении шнура.

На рис. 2 показано изменение в процессе разряда среднего значения концентрации нейтральных атомов водорода в плазменном шнуре, рассчитанного по измеренным интенсивностям линии H_{α} и H_{β} для двух последовательных разрядов для одного и того же режима опыта.

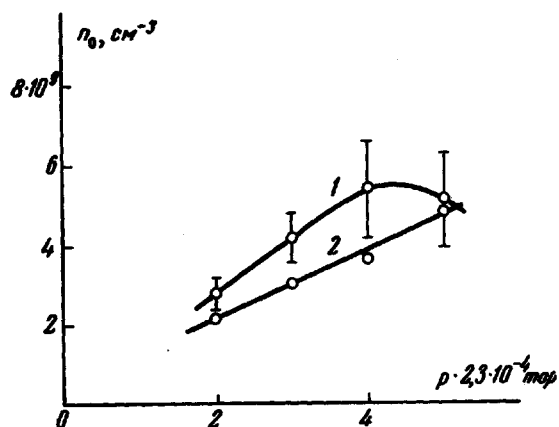


Рис. 3. Зависимость концентрации нейтральных атомов водорода в плазменном шнуре от начального давления 1 – кривая для второй миллисекунды разряда; 2 – кривая для четвертой миллисекунды разряда. Режим опыта: $I = 40 \text{ кА}$, $N_z = 24 \text{ кэ}$

Концентрация нейтральных атомов в плазменном шнуре для исследованных нами режимов оказалась равной $(1 - 7) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. В процессе разряда от 2,5 до 4 мсек концентрация нейтральных атомов в шнуре уменьшается. На рис. 3 приведена зависимость величины концентрации нейтральных атомов от начального давления для 2,5 и 4 мсек разряда,

усредненных по нескольким разрядам для каждого режима опыта. С ростом начального давления концентрация нейтральных атомов в шнуре растет. Относительное содержание нейтральных атомов при концентрации электронов $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ составляет $2 \cdot 10^{-4}$ и с уменьшением концентрации электронов до $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ возрастает до $(0,8 - 1) \cdot 10^{-3}$.

Используя полученные значения концентрации нейтральных атомов водорода и электронов, а также температуры электронов, можно оценить до какой температуры могут нагреваться ионы за счет кулоновских соударений с учетом потерь на перезарядку.

При больших концентрациях температура электронов была порядка 400 эв, а отношение концентраций $(1 - 2) \cdot 10^{-4}$. Рассчитанная величина ионной температуры оказывается равной 140 - 210 эв, а измеренная по спектру нейтральных атомов перезарядки [7] оказывается равной 150 эв. При малых плотностях рассчитанная тем же путем температура ионов оказывается равной 40 - 50 эв, а измеренная 50 эв. Это позволяет считать, что потери энергии за счет перезарядки в исследованных нами режимах могут иметь существенное значение в энергобалансе ионов.

Концентрация нейтральных атомов практически остается одинаковой для различных значений разрядного тока и напряженностей продольного магнитного поля.

Поступило в редакцию
9 мая 1968 г.

Литература

- [1] D. R. Bates. A. E. Kingston. Planet. Space Sci., 11, 1, 1963.
- [2] R. W. P. McWhirter, A. G. Hearn. Proc. Phys. Soc., 82, 641, 1963.
- [3] Д.П.Иванов, К.А.Разумова, А.М.Ус. Доклад на IV Международном симпозиуме по инженерным проблемам термоядерных исследований, Италия, Фраскати, 1966.
- [4] Л.А.Арцимович, Г.А.Бобровский, С.В.Мирнов, К.А.Разумова, В.С.Стрелков. АЭ, 22, 259, 1967.
- [5] Е.П.Горбунов, К.А.Разумова. АЭ, 15, 363, 1963.
- [6] Э.И.Кузнецов. ЖТФ, 37, 1550, 1967.
- [7] В.В.Афросимов, М.П.Петров. ЖТФ, 37, 1997, 1967.