о причине наблюдаемого аномально быстрого переноса электронов в токамаках (и при диффузии бома) и о способе его подавления

И.А. Бориев

Филиал Института Энергетических Проблем Химической Физики РАН
Черноголовка, Российская Федерация, boriev@binep.ac.ru

При организации магнитного удержания плазмы в установках для реализации УТС (токамаки, стеллаторы) обнаружилась проблема неожиданно быстрого (т.н. аномального) переноса электронов в горячей плазме, а именно, наблюдаемая подвижность (скорость дрейфа) электронов значительно (на порядок и более) превышает ее расчетную величину (из сечений их рассеяния). Быстрый перенос горячих электронных потоков к стенкам установки вызывает их быстрое разрушение и вынос вещества стенок в объем установки, что приводит к невозможности достичь условия реализации УТС. Задача защиты стенок от воздействия потоков горячих электронов является актуальной, и ее решению различными способами уделяется значительное внимание. Для ее успешного решения, естественно, важно знать причину наблюдаемого аномально быстрого переноса электронов.

Как показывают результаты теоретического описания процессов переноса (дрейфа) и разогрева электронов в веществе под действием силы электрического поля, время релаксации импульса переноса упруго рассеиваемых электронов значительно (от 16 до 4 раз) превышает время их свободного пробега в веществе [1]. Этот результат основан на учете закона сохранения для импульса силового переноса электрона и того факта, что упруго рассеиваемые электроны рассеиваются изотропно, т.к. они много легче частиц вещества. Общепринято же полагать (исходя из этой изотропии), что время релаксации равно времени свободного пробега, а это неверное допущение приводит к значительной недооценке расчетной скорости дрейфа (подвижности) электронов. Для равновесных (тепловых) электронов эта недооценка составит 16 раз, а по мере разогрева электронов в сильном электрическом поле она уменьшится до 4-х раз [1]. Таким образом, наблюдаемый быстрый перенос электронов не является аномальным, т.к. реально он таким и должен быть.

Аномально быстрый перенос электронов был зафиксирован еще в экспериментах Д. Бома по изучению дрейфа электронов в плазме в скрещенных магнитном и электрическом полях. Для его объяснения Д.Бом ввел представление о магнитодинамической хаотизации движения дрейфующих электронов и получил, что для согласия с экспериментом общепринято рассчитываемую подвижность электронов и, соответственно, скорость их дрейфа нужно увеличить в 16 раз (т.н. коэффициент диффузии Бома). Результат Д. Бома соответствует выше приведенной величине 16 для тепловых электронов, что и естественно, т.к. изотропия рассеяния электронов в веществе и означает хаотизацию их движения.

В токамаках наблюдается перенос электронов и менее быстрый, чем дает коэффициент Бома 16, и это происходит при дополнительном разогреве электронов электрическим полем свыше тепловой энергии среды, когда поправочная величина 16 может быть уменьшена до 4 [1]. Таким образом, согласно выводам теории [1], методом подавления аномально быстрого переноса электронов является их разогрев внешним электрическим полем, когда скорость дрейфа (подвижность) электронов может быть существенно уменьшена (до 4 раз).

Литература

1. Бориев И.А. Количественная связь времени релаксации импульса переноса электронов в веществе под действием силы электрического поля со временем их свободного пробега// Известия Академии Наук, сер. Энергетика, 2012, №3, С.105-112.