Исследование переноса ядер примесей и рабочего газа в режимах с электронно-циклотронным резонансным нагревом на токамаке Т-10 [[1]](#endnote-1)\*)

В.А. Крупин1, И.С. Кудашев1,3, М.Р. Нургалиев1, И.А. Земцов1,4, А.Р. Немец1, А.Ю. Днестровский1, Д.В. Сарычев1, Н.А. Соловьев1, Д.В. Рыжаков1, Д.С. Сергеев1, Т.Б. Мялтон1, С.Н. Тугаринов1, Н.Н. Науменко2

1НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия, [iskudashev@gmail.com](mailto:iskudashev@gmail.com)  
2Институт физики НАН РБ, Минск, Республика Беларусь   
3НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия  
4МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Наличие примесей в термоядерной плазме создает одну из основных проблем термоядерной энергетики. Накопление легких примесей в центре плазменного шнура приводит к разбавлению концентрации ионов рабочего газа, что снижает эффективность работы термоядерного реактора. Помимо этого примеси могут в значительной степени влиять на эффективность всех видов нагрева плазмы, на процессы переноса и устойчивости плазменного шнура.

Проблема переноса примесей изучается более 40 лет на различных токамаках, в различных режимах (L-, H-, I-моды) и с различными способами нагрева плазмы (омическим, пучками нейтралов и с помощью ЭЦР, ИЦР и LH излучений).

Цель настоящей работы состоит в определении степени влияния электронно-циклотронного резонансного нагрева (ЭЦРН) на перенос ядер примеси углерода (С6+) и ионов рабочего газа (D+). Работа основывается на результатах экспериментов на токамаке Т-10, проведенных в период с 2015 по 2018 гг. Для выбранных разрядов с различной конфигурацией ЭЦР-нагрева была проведена обработка экспериментальных данных с последующем моделированием переноса С6+ и D+ при помощи кодов ASTRA и STRAHL. Концентрация и температура ионов C6+ и D+ измерялась при помощи CXRS-диагностики. Измерения электронной температуры проводились с помощью измерений ЭЦ излучения плазмы на 2-ой гармонике и спектра излучения плазмы в области мягкого рентгена. Плотность электронов измерялась с помощью 16-канального интерферометра.

В работе получено, что при введении нецентрального ЭЦРН происходит аккумуляция ядер С6+ в центре шнура с накоплением их абсолютной концентрации в разряде. Одновременно с этим происходит уплощение профиля плотности ионов рабочего газа D+ и удаление их из центра шнура. В результате нецентральный ЭЦР нагрев должен приводить к усилению негативного эффекта разбавления D+ в условиях токамака-реактора. При введении центрального ЭЦРН на фоне эффекта pump-out (ухудшение удержания электронов) происходит и определенное ухудшение удержания углерода. При этом удаление ионов D+ из плазмы при ЭЦР нагреве проявляется либо явно, либо оказывается в определенной степени замаскировано процессом возврата дейтерия в разряд (“pump-in”) в случае высокого насыщения стенок вакуумной камеры дейтерием.

Эксперименты, проведенные в литиезованной плазме Т-10 с низким уровнем возврата дейтерия в разряд при ЭЦР нагреве, позволили обнаружить, что ухудшение удержания ионов D+ при центральном ЭЦРН вследствие “pump-out” эффекта существенно превышает соответствующее ухудшение удержания ядер С6+. В результате при центральном ЭЦР нагреве наблюдается абсолютное уменьшение в центре шнура концентрации ионов рабочего газа D+, которое сопровождается еще и заметным усилением разбавления концентрации D+ ядрами легких примесей. При нецентральном ЭЦР нагреве, помимо ухудшения удержания ионов D+ и возникновения “pump-out” выброса дейтронов из плазмы, резко усиливается процесс разбавления ионов D+ ядрами легких примесей в центральных областях шнура.

1. \*) [DOI – тезисы на английском](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVIII/Mu/en/AJ-Kudashev_e.docx) [↑](#endnote-ref-1)