

АНОМАЛЬНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ ВОЛН ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ЦИКЛОТРОННОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ ^{*)}

Гусаков Е.З., Попов А.Ю.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Evgeniy.Gusakov@mail.ioffe.ru

Электронный циклотронный резонансный нагрев (ЭЦРН) плазмы широко используется в тороидальных установках с магнитным удержанием плазмы и рассматривается, как основной для применения в ИТЭРе с целью нагрева плазмы и подавления неоклассической тиринг-моды. В настоящий момент рассматривается возможность резкого увеличения мощности ЭЦРН в ИТЭРе с 20 МВт до 60 МВт. Согласно предсказаниям теории, развитой в 80-е годы прошлого века, нелинейные эффекты и, прежде всего, параметрические распадные неустойчивости (ПРН) в условиях экспериментов по ЭЦРН должны быть стабилизированы за счёт сильного конвективного выноса энергии дочерних волн из области распада. Тем не менее в течении последних 15 лет было получено много экспериментальных свидетельств возбуждения аномальных явлений в ходе ЭЦРН мегаваттного уровня мощности. Наиболее яркими и прозрачными из них являются наблюдения излучения плазмы на частотах, сдвинутых вниз от частоты греющего гиротрона, сделанные сначала на токамаке TEXTOR, а затем на ASDEX-UG и на стеллараторе W-7X. На токамаке ASDEX-UG недавно было обнаружено также и излучение плазмы на частоте равной половине частоты накачки. Убедительная демонстрация эффекта нагрева ионов при ЭЦРН была представлена на токамаке TCV и стеллараторе TJ-II в условиях крайне затруднённого обмена энергией электронов и ионов. Более того, существенное уширение области выделения мощности нагрева по сравнению с предсказаниями линейной теории было продемонстрировано в ЭЦРН экспериментах на стеллараторе J-2M и токамаке T-10.

В настоящем сообщении будет дан обзор экспериментальных наблюдений аномальных явлений при ЭЦРН и представлена теоретическая модель, принимающая во внимание, в отличии от стандартной теории, возможность локализации дочерних волн в случае немонотонного профиля плотности, имеющего место на оси разряда, в магнитном острове, в плазменном филаменте или за счёт эффекта “density pump out” и позволяющая объяснить низко-пороговое возбуждение ПРН. Аномальное излучение плазмы и нагрев ионов в этой модели объясняются, как результат вторичных нелинейных волновых процессов, сопровождающих первичную низко-пороговую ПРН, ведущую к возбуждению запертых в плазме волн. Первичная ПРН в этой модели насыщается как в результате каскада вторичных распадов, так и вследствие истощения волны накачки. При этом аномальное излучение плазмы генерируется при слиянии параметрически возбужденных плазменных волн и волны накачки. Этот механизм позволяет детально объяснить структуру спектра аномального излучения, которое может мешать работе микроволновых диагностик и его высокий уровень. В то же время он предсказывает аномальное поглощение накачки на уровне 10% - 70% полной мощности и объясняет передачу энергии ионной компоненте плазмы поглощением ионных мод, возбуждённых в ходе насыщения неустойчивости. В докладе будут представлены результаты детального теоретического анализа аномального излучения наблюдавшегося в токамаке TEXTOR и на стеллараторе W-7X, а также будет предложена интерпретация эффекта аномального уширения профиля выделения мощности при ЭЦРН в стеллараторе J-2M и на токамаке T-10.

Аналитическое рассмотрение эффекта аномального излучения поддержано грантом РФФ 22-12-00010; численное моделирование выполнено при поддержке ГЗ ФТИ 0040-2019-0023, а код, использованный при анализе насыщения ПРН, разработан в рамках ГЗ ФТИ 0034-2021-0003.

^{*)} [DOI – тезисы на английском](#)