

04;12

Неустойчивость „снейк“ в плазме сферического токамака Глобус-М

© М.И. Патров, Ю.В. Петров, В.К. Гусев, Г.С. Курскиев, А.Н. Новохацкий,
С.А. Сахаров, С.Ю. Толстяков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 21 февраля 2011 г.)

В ходе экспериментов с предельной плотностью плазмы в омическом режиме сферического токамака Глобус-М обнаружено, что при достижении некоторого значения плотности в центральной зоне плазменного шнура развивается сильная магнитогиродинамическая неустойчивость с возбуждением моды $m/n = 1/1$ типа „снейк“. Дальнейший рост плотности приводит к возникновению внутреннего срыва плазмы. Проведены численное моделирование динамики развития неустойчивости и сравнение с теорией и экспериментальными данными. Получено удовлетворительное соответствие экспериментальных и теоретических данных. Показано, что развитие неустойчивости обусловлено повышенным содержанием примесей в плазме и связанный с этим предел по плотности носит „технологический“ характер. При более тщательной подготовке вакуумной камеры этот предел удалось преодолеть, развитие неустойчивости „снейк“ также не наблюдалось, что позволило получить плотность плазменного шнура $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ с величиной параметра Гринвальда около 95%.

Введение

На сферическом токамаке Глобус-М при умеренных величинах плотности плазмы в диапазоне $\sim (3-5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в омическом режиме наблюдалось развитие неустойчивости, которая по ряду признаков была идентифицирована как возмущение типа „снейк“ („снейк“ от английского snake — змея). Свое название возмущение этого типа получило за характерный змеевидный трек сигнала мягкого рентгеновского излучения. Впервые неустойчивость „снейк“ была возбуждена инжекцией пеллетов в плазме токамака JET [1] и наблюдалась при помощи диагностики мягкого рентгеновского излучения как возмущение типа $m/n = 1/1$ (где m и n — полоидальное и тороидальное волновые числа возмущения соответственно). Позднее наблюдалось развитие „снейка“ и без инжекции пеллетов на JET [2] и других установках [3], в том числе на сферических токамаках MAST и NSTX [4,5].

В соответствии со сложившимися к настоящему времени представлениями условием развития неустойчивости „снейк“ является локальное охлаждение плазмы вблизи рациональной магнитной поверхности. Причиной локального охлаждения являются примесные частицы, содержащиеся в плазме или в инжектируемом пеллете. Такое охлаждение приводит к локальному спаду проводимости, уменьшению плотности тока и, как следствие, к формированию магнитного острова, который затем захватывает примесные частицы и формирует „снейк“. Охлаждение наиболее выражено в центре плазменного шнура — вблизи поверхности с величиной запаса устойчивости $q = 1$ [6]. Согласно различным моделям, старт наблюдаемого возмущения, т.е. начало развития „снейка“, может рассматриваться как следствие пилооб-

разных колебаний [2] или как развитие из существующей магнитогиродинамической (МГД) моды $1/1$ [6] и в последнее время — как самостоятельный процесс без видимых МГД триггеров [6–8].

Развитие неустойчивости типа „снейк“ является негативным фактором для разряда токамака, вызывающим охлаждение центральной зоны плазменного шнура и препятствующим достижению предельных параметров плазмы [5], что подтолкнуло нас к более детальному изучению причин возникновения и параметров данного типа неустойчивости. Конечной целью исследований являлось получение режимов работы токамака, в которых неустойчивость „снейк“ не развивается и становится возможным получать устойчивый плазменный шнур с более высокими значениями плотности плазмы.

На сферическом токамаке Глобус-М, с неустойчивостью „снейк“ авторы столкнулись в ходе экспериментов по достижению предельных значений плотности плазмы. Эти эксперименты были начаты в середине 2004 г. В тот период система стабилизации тока плазмы только разрабатывалась и соответственно не использовалась в экспериментах. Кроме того, внутренняя поверхность вакуумной камеры токамака, изготовленная из нержавеющей стали, была по большей части открыта для контакта с плазмой. Отсутствовали половина графитовых диверторных пластин, тороидальная диафрагма и защита экваториального пояса [9]. В серии экспериментов, выполненной без боронизации вакуумной камеры, наблюдалась деградация тока плазмы при увеличении скорости роста плотности плазмы с дальнейшим развитием перезамыкания и внутреннего срыва. Максимальная средняя по хорде плотность в этом режиме была ограничена развитием неустойчивости „снейк“ и не превышала $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

1. Эксперименты по достижению предельной плотности

В ходе экспериментов использовались несколько систем диагностического комплекса сферического токамака Глобус-М: три вертикальные хорды интерферометра с длиной волны зондирующего излучения 0.8 мм, многоканальная многоимпульсная система томсоновского рассеяния [10], комплекс диагностики МГД неустойчивостей — массивы тороидальных и полоидальных магнитных зондов, 32-канальная диагностика мягкого рентгеновского излучения [11] (рис. 1). Токamak оснащен автоматической системой управления положением плазменного шнура и системой стабилизации тока плазмы [12]. Напуск рабочего газа может осуществляться до

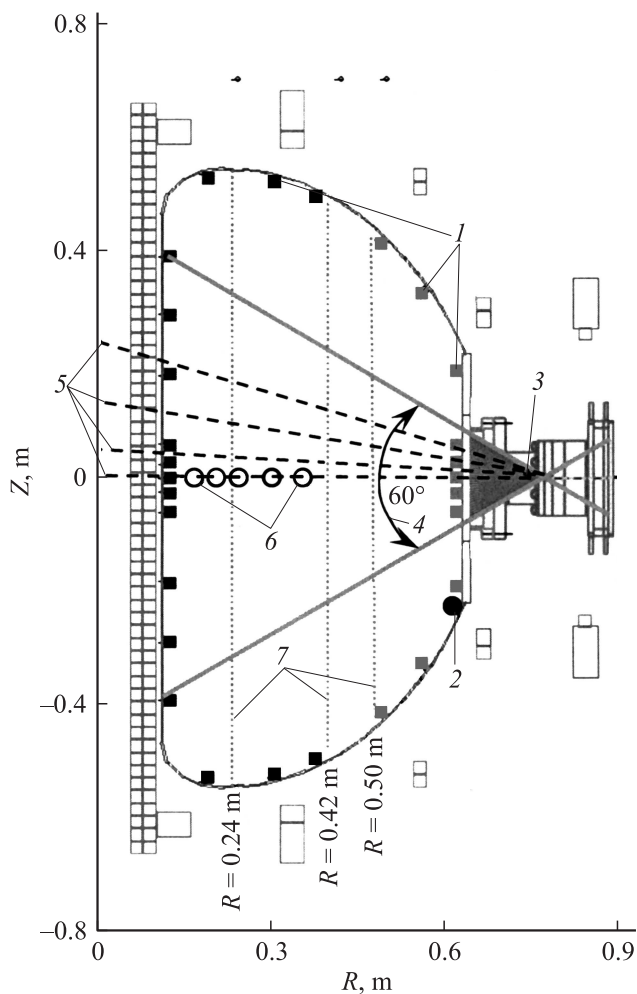


Рис. 1. Сечение вакуумной камеры токамака Глобус-М и расположение диагностик: 1,2 — полоидальный и тороидальный массивы магнитных зондов; 3,4 — 32-канальная камера мягкого рентгеновского излучения и наблюдаемый ракурс; 5 — хорды камеры мягкого рентгеновского излучения, сигнал которых моделировался (сверху вниз № № 8, 10, 12, 16); 6 — пространственное расположение точек диагностики томсоновского рассеяния, 7 — хорды интерферометра с длиной волны зондирующего излучения 0.8 мм.

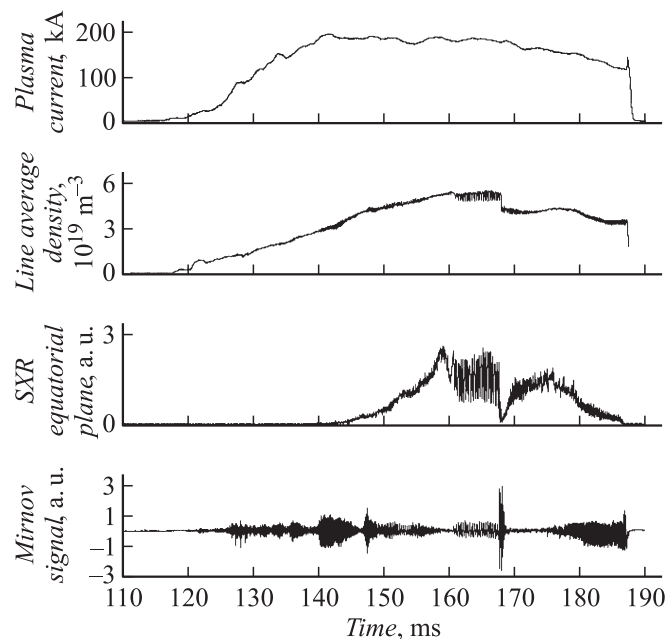


Рис. 2. Оциллограммы разрядов № 9332.

и в течение разряда токамака через несколько пьезоэлектрических клапанов. Эксперименты проводились в омическом режиме при тороидальном магнитном поле 0.4 Т и токе плазмы 150–250 кА.

С целью увеличения плотности плазмы была разработана процедура подготовки вакуумной камеры, включающая прогрев до температуры около 200°C в течение двух суток и чистку тлеющим разрядом в гелии продолжительностью свыше 40 ч. Для обеспечения наилучшего взаимодействия плазма–стенка непосредственно перед серией экспериментов проводится боронизация в тлеющем разряде гелия с добавлением карборана $V_{10}C_2H_{12}$ [9,13].

В серии, выполненной после боронизации вакуумной камеры, деградации тока плазмы не наблюдалось. При достижении величины средней по хорде плотности плазмы около $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ наблюдалось развитие неустойчивости типа „снейк“ (мода $m/n = 1/1$), которая идентифицировалась с помощью сигналов мягкого рентгеновского излучения и флуктуаций плотности. Одновременно развивалась внешняя винтовая неустойчивость моды $m/n = 2/1$, которая наблюдалась с помощью системы полоидальных и тороидальных зондов. Развитие этих неустойчивостей приводило к малому срыву, препятствующему дальнейшему росту плотности (рис. 2, 168 ms). Причиной срыва, по-видимому, являлось тороидальное зацепление мод $m/n = 1/1$ и $m/n = 2/1$ [14], что выражалось в совпадении частот осцилляций, регистрируемых датчиками мягкого рентгеновского излучения и магнитными зондами в течение всего времени развития „снейка“ со 159 до 168 ms разряда.

В ряде случаев в плазме Глобус-М „снейк“ наблюдался без видимых предшествующих МГД явлений. При

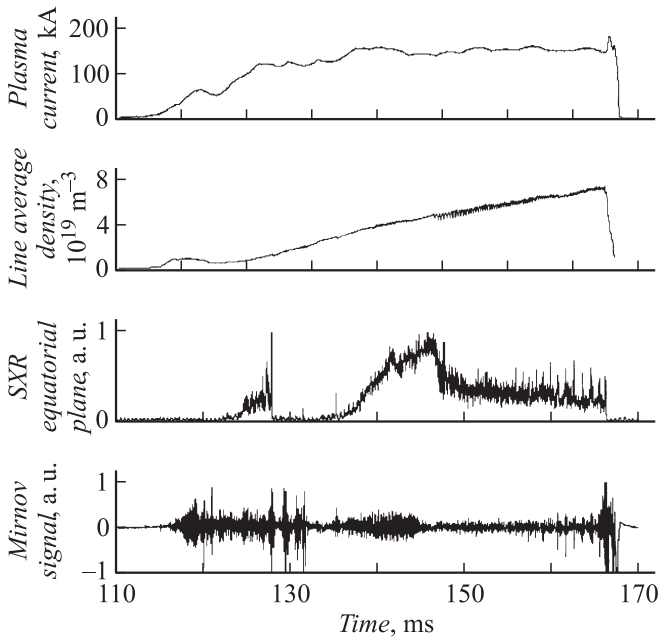


Рис. 3. Осциллограммы разряда № 15945.

токе плазмы 150–200 кА и средней по хорде плотности плазмы $(\sim 3-6) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, электронной температуре на оси шнура 350–500 эВ наблюдалось развитие „снейка“ с осцилляциями средней по хорде плотности 15–20%. Полная диссипация „снейка“ происходила за $\sim 10-20 \text{ ms}$, а в отдельных случаях „снейк“ существовал более 20 ms — до окончания разряда. Размеры „снейка“ в вертикальной плоскости составляли: диаметр $d_{SN} = 8-10 \text{ cm}$, радиус вращения $r_{SN} \sim 7.5 \text{ cm}$.

На рис. 3 приведены осциллограммы одного из характерных омических разрядов № 15945, в котором наблюдается неустойчивость „снейка“ со 146 по 168 ms. Начало осцилляций „снейк“ регистрируемое диагностикой мягкого рентгеновского излучения, изображено в псевдотрехмерном представлении на рис. 4, *a*. Из рисунка можно видеть отсутствие пилообразных колебаний до начала „снейка“ (до 146 ms). Слабые пилообразные колебания, которые развиваются на 157 ms, не оказывают существенного влияния на „снейк“ (рис. 4, *b*). МГД неустойчивости, развивающиеся до начала осцилляций „снейк“ обусловлены сценарием разряда токамака. Их развитие связано с увеличением тока плазмы и прохождением величин запаса устойчивости целочисленных значений.

2. Моделирование „снейка“ на токамаке Глобус-М

Для моделирования неустойчивости „снейк“ использовался код CORSA, созданный для сферического токамака MAST [7,8] и адаптированный авторами для условий установки Глобус-М. Теоретическая модель, заложенная

в этот код для случая развития „снейка“ без инъекции пеллетов, подразумевает аккумуляцию примесных ионов в центре шнура за счет пинчевания током плазмы, рост острова при появлении в плазме поверхности $q = 1$ и формирование „снейка“, а также последующую диссипацию „снейка“ в окружающую плазму. Код CORSA рассчитывает непосредственно стадии развития „снейка“. В рамках кода рассматривается диффузия частиц и теплопроводность между тремя областями плазменного шнура — островом и „снейком“ внутри поверхности $q = 1$ и остальным плазменным шнуром, прилегающим к поверхности $q = 1$ (рис. 5). Код позволяет провести моделирование профилей электронной температуры и концентрации, а также эмиссию тормозного излучения для различных хорд наблюдения от момента начала

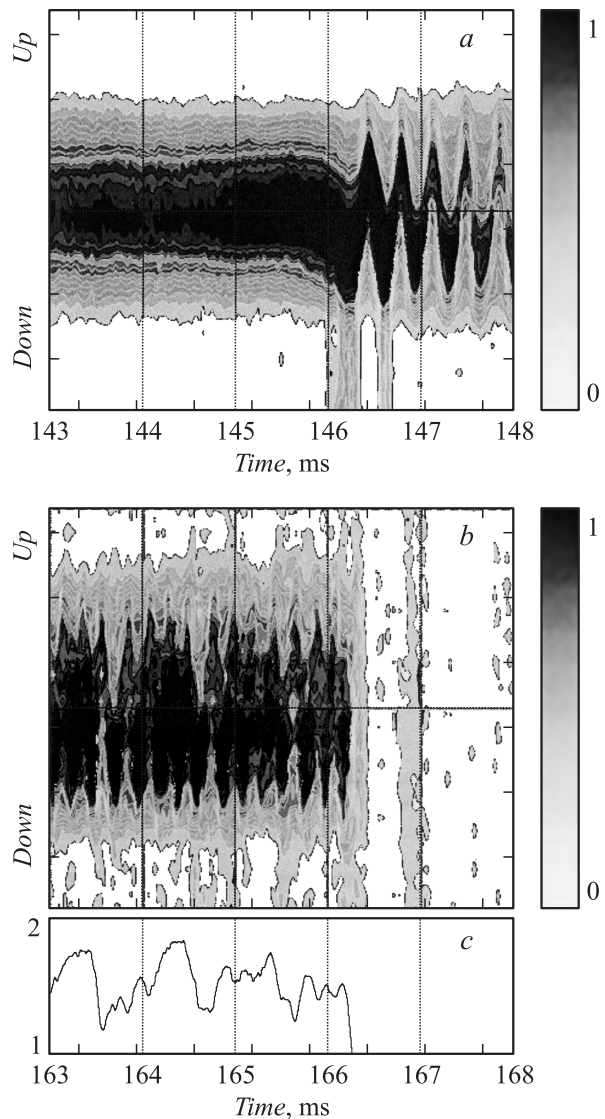


Рис. 4. Эмиссия мягкого рентгеновского излучения в разряде № 15945: *a* — начало и *b* — окончание осцилляций „снейк“, *c* — сигнал датчика, наблюдающего излучение в экваториальной плоскости, демонстрирует наличие пилообразных колебаний.

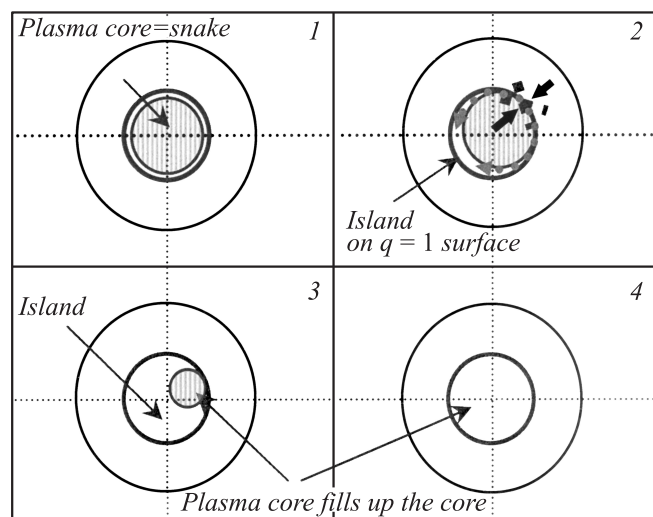


Рис. 5. Стадии развития „снейка“: 1 — аккумуляция примесных частиц внутри плазменного шнура, 2 — появление в плазме поверхности $q = 1$ и начало роста острова, 3 — заметный рост острова, наблюдение осцилляций „снейка“, 4 — полная диссипация „снейка“ в окружающую плазму.

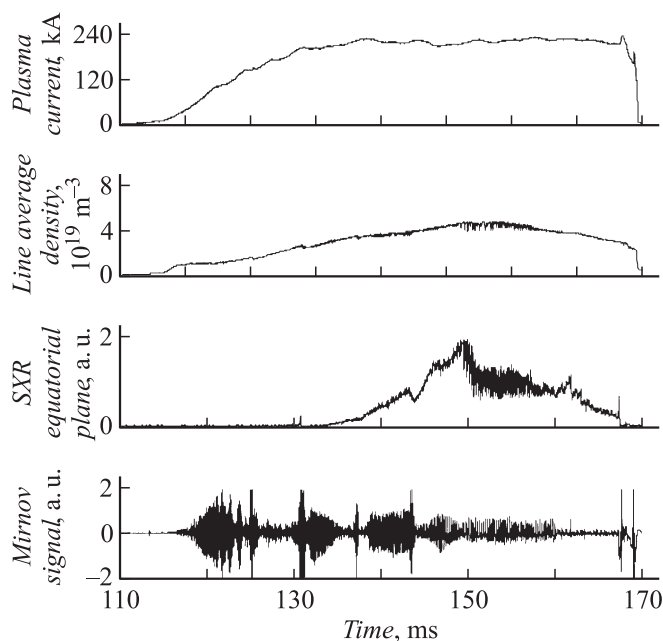


Рис. 6. Осциллограммы разряда № 13756.

осцилляций „снейка“ до его полной диссипации. Расчет проводится в цилиндрическом приближении, но для лучшего соответствия с реальной геометрией плазменного шнура вводятся поправки на величину вытянутости и треугольности поверхности $q = 1$. Необходимыми входными данными для расчета фактически являются: равновесные магнитные конфигурации плазменного шнура для всего временного интервала развития неустойчивости, коэффициенты диффузии и теплопроводности, профили электронной температуры и плотности плазмы,

профиль эффективного заряда плазмы — для момента времени, соответствующего началу развития „снейка“.

Для моделирования по коду CORSA был выбран омический разряд Глобус-М № 13 756, развитие неустойчивости „снейк“ в котором наблюдается со 149 по 160 ms (рис. 6). Равновесные магнитные конфигурации плазменного шнура были рассчитаны по коду EFIT [12], профили электронной температуры и плотности были измерены с помощью диагностики томсоновского рассеяния на 150, 155 и 160 ms, т.е. в моменты времени, соответствующие началу осцилляций „снейка“, середине и полной его диссипации. Для большей пространственной детализации профилей значения температуры и концен-

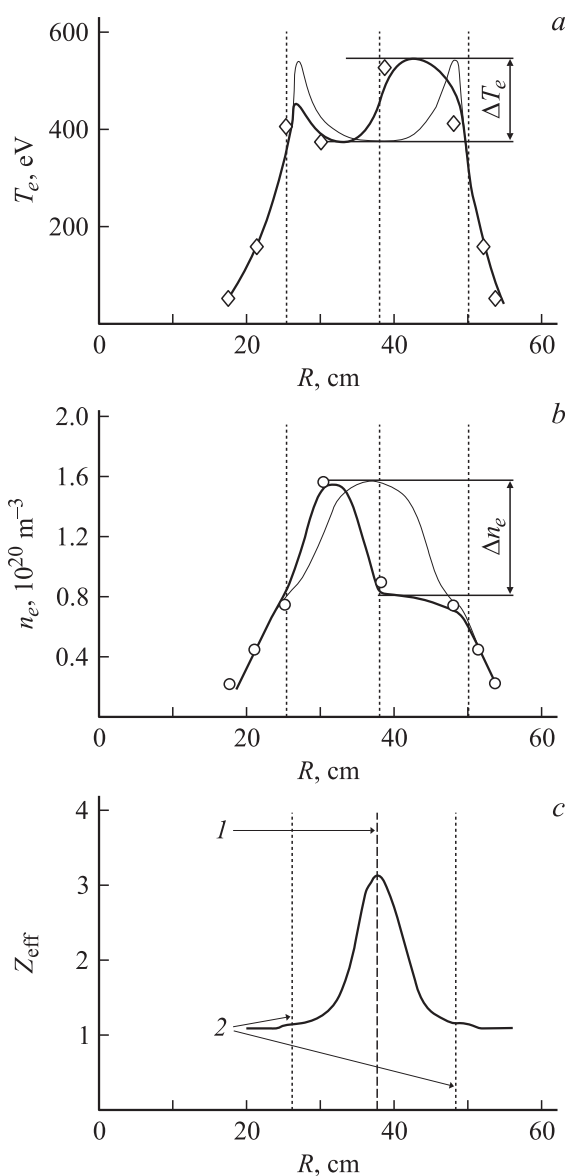


Рис. 7. Профили электронной температуры (a) и концентрации (b) в разряде № 13756, \blacklozenge — экспериментально измеренные на 150 ms, — — начальные, для расчета по коду CORSA для 149 ms, c — профиль эффективного заряда плазмы, 1 — магнитная ось, 2 — поверхность $q = 1$.

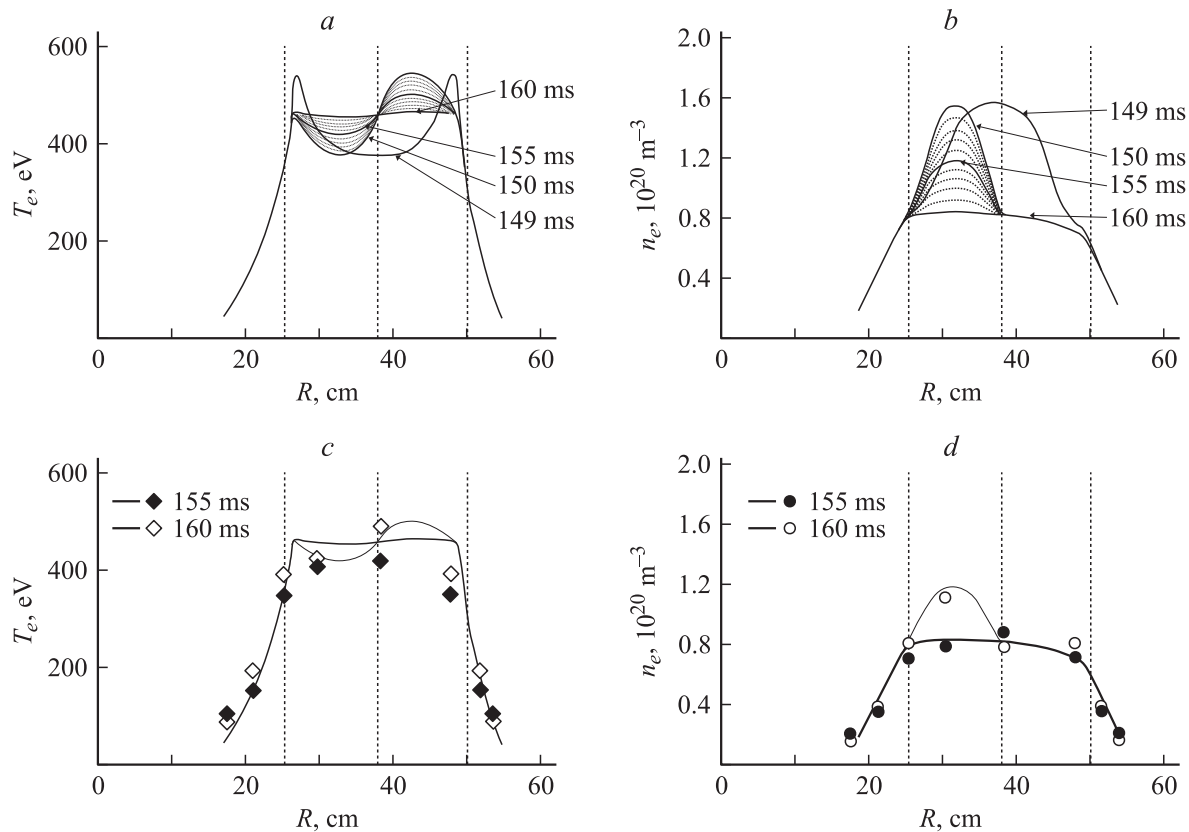


Рис. 8. Модельная временная эволюция профилей электронной температуры и концентрации в разряде № 13 756 в интервале времени 149–160 мс с шагом 1 мс (*a, b*) и сравнение модельных и экспериментальных профилей электронной температуры и концентрации в разряде № 13 756 на 155 и 160 мс (*c, d*).

трации, измеренные в трех пространственных точках вне поверхности с $q = 1$ со стороны сильного тороидального магнитного поля, были перенесены по магнитным поверхностям на сторону слабого тороидального магнитного поля. На основании профилей, измеренных на 150 мс (рис. 7, *a*), т.е. примерно через 1 мс после начала осцилляций „снейка“, были построены начальные профили для моделирования. Для этого предполагалось, что на 149 мс холодная и плотная область „снейка“ занимает всю центральную область плазменного шнура внутри поверхности $q = 1$ и имеет возмущение температуры и концентрации относительно окружающей плазмы ΔT_e и Δn_e той же величины, что и на 150 мс (рис. 7, *b*). Ввиду того, что экспериментальные измерения профиля эффективного заряда плазмы на токамаке Глобус-М на данный момент не проводились, в расчетах использовались данные, полученные в омическом режиме на токамаке MAST [8] и масштабированные для токамака Глобус-М с учетом измерений проводимости плазмы (рис. 7, *c*). Коэффициенты диффузии и температуропроводности были получены из предварительных расчетов по коду ASTRA, проведенных согласно [15], и составляли для центральной области плазменного шнура $D_{\perp} \sim 2.0 \text{ м}^2/\text{с}$ и $\chi_{\perp} \sim 8.0 \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно.

В результате проведенных расчетов была получена временная эволюция профилей электронной температуры и концентрации, а также эмиссии рентгеновского излучения по четырем хордам, соответствующим хордам наблюдения 32-канальной диагностики мягкого рентгеновского излучения. Следует обратить внимание, что при расчете эволюции электронной температуры и концентрации по коду CORSA вращение острова не учитывается. Рассматривается стационарное положение „снейка“ в экваториальной плоскости со стороны сильного тороидального магнитного поля. Профили, соответствующие последовательным моментам времени, таким образом, отражают только диссипацию „снейка“ без его вращения (рис. 8, *a, b*). Поэтому для сравнения модельного профиля с экспериментальными данными на 155 мс необходимо провести перерасчет модельного профиля по магнитным поверхностям в соответствии с наблюдаемым экспериментальным положением „снейка“. Сравнение данных на 160 мс можно проводить напрямую, так как этот момент времени соответствует полной диссипации „снейка“ (рис. 8, *c, d*). Сравнение эмиссии мягкого рентгеновского излучения по хордам №№ 8, 10, 12 и 16 приведено на рис. 9 (эти хорды наблюдения выделены пунктирными линиями на рис. 1).

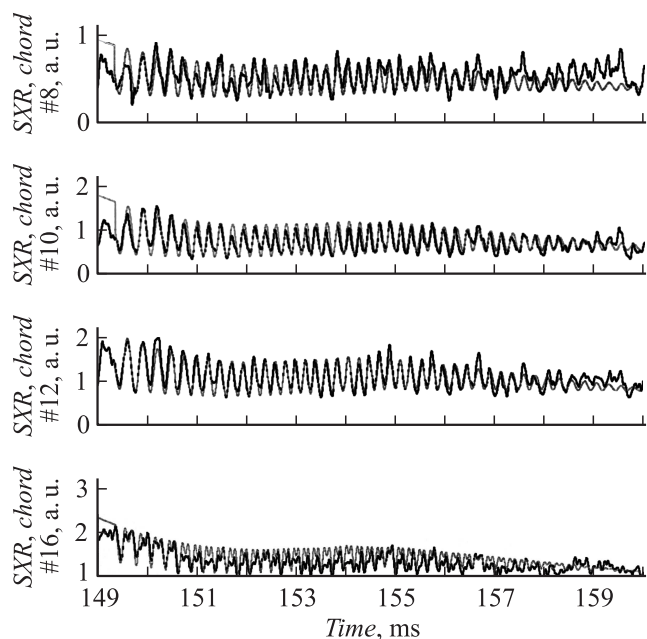


Рис. 9. Сравнение модельной и экспериментально наблюдаемой эмиссии мягкого рентгеновского излучения по хордам 8, 10, 12, 16 (см. рис. 1) в разряде № 13 756 в интервале времени 149–160 мс. — experiment, — modelling.

3. Обсуждение результатов

Как уже говорилось, многообразие используемых в расчетах моделей не позволяло до последнего времени однозначно определить причину возбуждения „снейка“. Представлялось, что наиболее вероятной гипотезой о возбуждении „снейка“ является повышенное содержание в плазме примесных частиц [5,7,8], что, однако, требовало подтверждения применительно к условиям Глобус-М.

Проведенные измерения и моделирование омического разряда № 13 756 продемонстрировало удовлетворительное соответствие расчетных профилей электронной температуры и концентрации с экспериментальными (отклонение около 10–15%). Также удовлетворительно совпадают расчетные и измеренные профили эмиссии мягкого рентгеновского излучения (отклонение около 10–20%). Учитывая отсутствие экспериментальных данных о профиле эффективного заряда в плазме Глобус-М, такое соответствие свидетельствует о правильно построенной модели расчетов.

Таким образом, результаты эксперимента и моделирования, на наш взгляд, дают основание предположить, что наиболее вероятной причиной развития „снейка“ в токамаке Глобус-М является поступление в плазму большого количества примесных частиц и их аккумуляция в центральной области плазменного шнура. Причем повышенное содержание примесных частиц обусловлено, по всей видимости, недостаточной подготовкой вакуумной камеры к эксперименту либо недостаточной точностью

поддержания равновесия плазменного шнура. Это косвенно подтверждается тем, что в сериях разрядов, в течение которых „снейк“ не наблюдался, уровень свечения спектральных линий двукратно ионизованного углерода был в 2–3 раза ниже, чем в сериях, в которых разряды сопровождались развитием этой неустойчивости. Таким образом, наблюдаемый предел по плотности плазмы, связанный со срывом, возникающим ввиду развития неустойчивости „снейк“, оказывается в большей степени лишь технологическим пределом. Это подтвердили последующие серии экспериментов.

Технологический предел по плотности удалось преодолеть после замены системы откачки камеры на безмасляную и установки на большую часть внутренней поверхности вакуумной камеры защитных плиток из рекристаллизованного графита [9]. Кроме этого, была модернизирована система управления, что значительно улучшило точность поддержания равновесия плазменного шнура. В результате развитие „снейка“ практически не наблюдалось, стала доступна область более высоких плотностей плазмы. Рекордные для Глобус-М параметры плазмы были получены в серии после 2–3 предварительных „чистящих“ омических разрядов с низкой плотностью. В результате в отдельных разрядах было достигнуто значение средней по хорде плотности плазмы более $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Отношение плотности плазмы к плотности Гринвальда в таких разрядах ($n_G = I_P / \pi \cdot a^2$, где I_P — ток плазмы, a — малый радиус) составляет около 95% (рис. 10). Попытки достичь больших значений плотности плазмы путем напуска рабочего газа в течение разряда с различной скоростью не дали видимых результатов [16]. Дальнейший рост плотности плазмы, скорее всего, ограничен достижением предела Гринвальда по плотности.

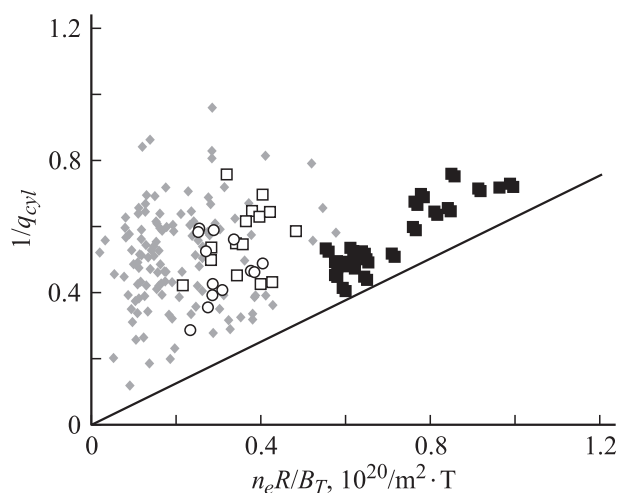


Рис. 10. Диаграмма Гринвальда для омических разрядов Глобус-М: ○ — разряды, проведенные без боронизации вакуумной камеры, □ — разряды, проведенные после боронизации вакуумной камеры, ■ — рекордные омические разряды, ◆ — прочие разряды, демонстрирующие диапазон рабочих параметров установки, — предел Гринвальда.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Калэмского научного центра (Culham Science Centre) Вильяму Моррису (A.W. Morris) и Жан Паоло Турри (G.P. Turri) за предоставленную возможность обмена опытом и помощь в адаптации кода CORSA для токамака Глобус-М.

Список литературы

- [1] *Weller A.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 59. P. 2303.
- [2] *Gill R.D.* et al. // Nucl. Fusion. 1992. Vol. 32. N 5. P. 723–735.
- [3] *Liqun Hu* et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. Vol. 45. N 4. P. 349–367.
- [4] *Buttery R.J., Akers R., Arends E.* et al. // Nucl. Fusion. 2004. Vol. 44. P. 1027–1035.
- [5] *Kaye S.M., Bell M.G., Bell R.E.* et al. Technical report PPPL–3454, 2000. Princeton, USA.
- [6] *Wesson J.A.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1995. Vol. 37. P. A337–A346.
- [7] *G.Turri G.* et al. // Proc. of 31th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys., London, 28 June–2 July 2004 ECA. Vol. 28A. P. 4.192.
- [8] *Lehane I.* et al. // Proc. of 30th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7–11 July 2003. ECA. Vol. 27A. P-3.092.
- [9] *Gusev V.K.* et al. // Nucl. Fusion. 2009. Vol. 49. P. 104021 (11 pp).
- [10] *Гусев В.К., Толстяков С.Ю., Варфоломеев В.И.* и др. В сб. вопросы атомной науки и техники. 2007. Вып. 1. С. 39–56.
- [11] *Патров М.И., Бендер С.Е., Гусев В.К.* и др. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 2. С. 81–90.
- [12] *Гусев В.К., Бендер С.Е., Деч А.В.* и др. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 8. С. 25.
- [13] *Sakharov N.V.* et al. // Proc. of 29th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Montreux, Switzerland, 17–21 June 2002. P-5.078.
- [14] *Gusev V.K., Chernyshev F.V., Golant V.E.* et al. // Nucl. Fusion 2006. Vol. 46. N 8. P. 584–591.
- [15] *Senichenkov I.Yu., Rozhansky V.A., Bogomolov A.V.* et al. // Proc. of 35th EPS Plasma Phys Conf., 9–13 June 2008, Hersonissos, Crete, Greece, 2008. P2.046. P 3.
- [16] *Pertov Yu.V., Bender S.E., Gusev V.K.* et al. Plasma MHD Stability at Limiting Density on Globus M. P4–103, Proc. of 33rd EPS Plasma Physics Conference, 19–23 June 2006, Roma, Italy.