

## ШИРОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ГОРБА В ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЕ

*В.В.Питерский, Е.Е.Юшманов, А.Н.Яковец*

*Российский научный центр "Курчатовский Институт"  
123182 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 23 мая 1996 г.

После переработки 4 июля 1996 г.

Экспериментально обнаружена низкочастотная неустойчивость замагниченной горячей плазмы, возникающая при горбообразном поперечном профиле потенциала. Действие неустойчивости приводит к тому, что в области потенциального максимума происходит распадение плазмы на цепочку плотных сгустков и глубоких разрежений. Неустойчивость обязана неоднородному  $E \times B$ -дрейфу и является, по-видимому, неустойчивостью Рэлея, которая достигает сильно нелинейной стадии. При этом возникает сильный поперечный перенос, приводящий к потерям плазмы.

PACS: 52.35.Py

1. Введение. Вот уже долгое время в физике плазмы существует особый интерес к эффекту подавления турбулентности широм потоковой скорости (shear flow). Этот интерес был изначально вызван открытием  $H$ -режимов в токамаках, когда обнаружилось, что образование транспортного барьера на краю шнура обязано, по-видимому, сильному  $E \times B$ -ширу, возникающему в этой области. Последующие наблюдения принесли множество подтверждений такой точке зрения, в связи с чем появилось большое количество теоретических работ, а также был поставлен ряд специальных не токамачных экспериментов, нацеленных на изучение стабилизирующего действия шира скорости [1–4]. Но еще намного раньше была осознана противоположная способность шира скорости – становиться возбудителем неустойчивостей [5,6]. Тем не менее, экспериментальные данные о широкой неустойчивости плазмы, так называемой неустойчивости Кельвина–Гельмгольца<sup>1)</sup> (НКГ), остаются пока немногочисленными [7–9]. Причем в каждом установленном случае наблюдаемая неустойчивость обладает своими особыми чертами и механизмом раскачки. Так, в работе [7] выявлена и изучена НКГ, возникающая в однородном плазменном столбе с узким вращающимся слоем (геометрия струи). В работе [9] в более сложных условиях обнаружена весьма активная неустойчивость, интерпретированная как результат совместного действия дрейфового шира, градиента плотности и эффекта конечного ионного ларморовского радиуса (КЛР). В представляемой ниже работе сообщаются данные об обнаруженной новой широкой неустойчивости, возникающей в столбе горячей плазмы, если на поперечном профиле потенциала имеется достаточно крутой горб. Неустойчивость связана, по-видимому, с тем, что вершина горба является точкой перегиба профиля дрейфовой скорости, то есть точкой выполнения известного условия Рэлея  $V'' = 0$  для неустойчивости плазмы с неоднородной скоростью.

<sup>1)</sup> Термин "неустойчивость Кельвина–Гельмгольца" по отношению к плазме не обрел, по-видимому, четких границ применения и часто используется в более широком смысле.

2. Постановка эксперимента. Неустойчивость была обнаружена при проведении экспериментов по изучению стабилизирующего действия шира скорости на некоторые известные моды [4]. На рис.1 показана схема установки ПР-8, представляющей длинную пробочную ловушку ( $L = 4$  м) с касповыми ячейками на концах, обеспечивающими МГД устойчивость. Величина магнитного поля в центральной секции 3 кГс. С помощью импульсного источника в ловушке создается столб водородной плазмы с диаметром около 10 см,  $n \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_i \approx 50 \text{ эВ}$  и  $T_e \approx 20 \text{ эВ}$ , при  $p_0 \approx 1 \cdot 10^{-6}$  торр. Импульс инжекции длится несколько мсек, после чего источник выключается и начинается свободный распад накопленной плазмы. Он протекает достаточно медленно ( $\tau \approx 1$  мс) и спокойно. На фоне этого процесса возникают последовательно несколько слабых хорошо изученных неустойчивостей, представляющих удобные объекты для исследования действия скоростного шира. Этот последний создается путем придания плазменному столбу неоднородного (с проскальзыванием)  $E \times B$ -вращения. Для этого используется кольцо из нетолстой проволоки, помещенное в каспе недалеко от его центра симметрично относительно оси, как показано на рис.1. На кольцо подается положительное смещение, что вызывает появление горба на радиальном профиле потенциала плазмы в центральной секции. Потенциальный горб можно перемещать по радиусу, двигая кольцо вдоль оси. Смещение включается в произвольный момент процесса распада и представляет прямоугольный импульс той или иной длительности. Присутствие кольца и подача на него смещения никак не сказываются на состоянии плазменного столба, кроме изменения потенциального профиля. Типичный профиль (измеренный зондом) при включении смещения  $U = 120 \text{ В}$  показан на рис.2. Вершина горба расположена на проекции кольца вдоль магнитных силовых линий. На рисунке приведен потенциал плавления, истинный же потенциал выше его на  $10 \div 15 \text{ В}$  (в хвосте распада  $T_e$  составляет  $3 \div 5 \text{ эВ}$ ). Как видно, потенциал плазмы в максимуме горба значительно ниже потенциала кольца, составляет лишь около 40% от последнего.

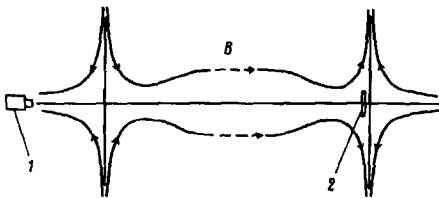


Рис.1. Схема установки ПР-8. 1 - плазменный источник, 2 - кольцевой электрод

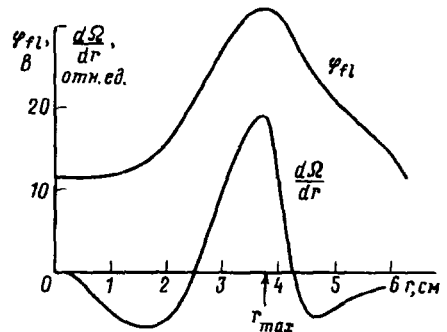


Рис.2. Радиальные профили потенциала плазмы и шира дрейфового вращения при смещении  $U = 120 \text{ В}$

Максимум потенциала является также и максимумом шира дрейфовой скорости  $V_E = cE_r/B$ . Однако в силу цилиндричности показательной величиной проскальзывания потока является не шир линейной скорости  $dV_E/dr$ , а шир угловой скорости вращения  $d\Omega/dr$  ( $\Omega = V_E/r$ ), профиль которого показан на

том же рисунке. Максимум шира вращения несколько смещен к центру относительно вершины потенциального горба, но при значительной крутизне последнего это смещение почти неощутимо.

3. Полученные результаты. Начальная цель опыта состояла в стабилизации широм дрейфово-конусной моды [4]. Этот эффект был в полной мере достигнут при величине смещения  $U = 40 \div 50$  В. Какие-либо побочные негативные действия шира при этом отсутствовали. Но уже при  $U = 60 \div 70$  В появились симптомы неизвестной неустойчивости. На рис.3а показаны сигналы потенциала плазмы в точке  $r = 3.5$  см при подаче импульсов смещения разной величины. Включение смещения сопровождается соответствующим увеличением потенциала в виде "столика" во времени. При малых смещениях верхушка его гладкая; при  $U = 70$  В на ней появляется рябь, которая с увеличением  $U$  переходит в сильные флуктуации. Возникновение неустойчивости сопровождается сильными потерями плазмы, о чем свидетельствует рис.3б, на котором показаны кривые распада плазмы в ловушке для тех же трех случаев. Видно, что при таких  $U$ , когда неустойчивость возбуждается, налицо значительное ускорение распада в то время, пока включено смещение.

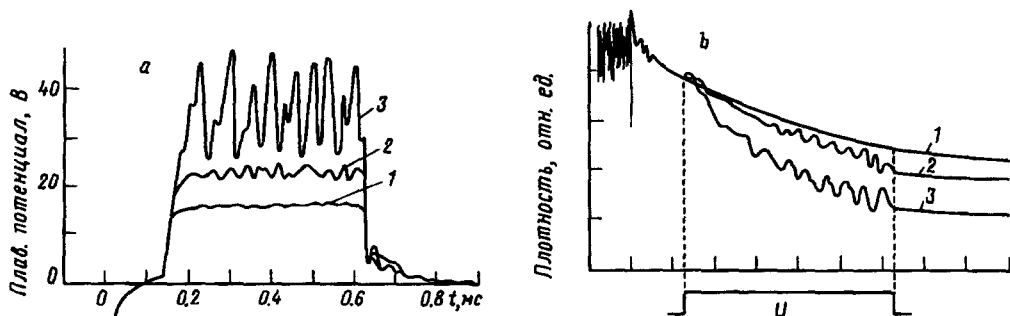


Рис.3. Внешние проявления неустойчивости. а - поведение потенциала плазмы при подаче импульсов смещения  $U$  (1 -  $U = 50$  В, 2 -  $U = 70$  В, 3 -  $U = 120$  В); б - соответствующие кривые распада плазмы (инжекция выключается в момент времени  $t = 0$ ) при 1 -  $U < 50$  В, 2 -  $U = 70$  В, 3 -  $U = 120$  В

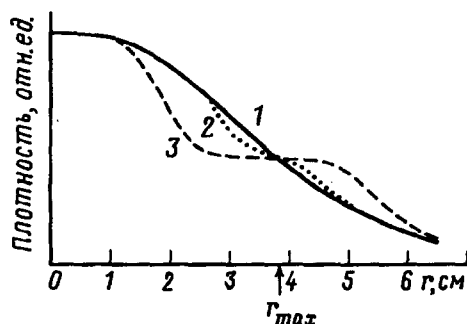


Рис.4. Изменение профиля плотности под действием неустойчивости. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют  $U = 50, 70$  и  $120$  В

На рис.4 показано воздействие неустойчивости на радиальный профиль плотности в плазменном столбе. Видно, что профиль претерпевает сильную деформацию, которая устанавливается вскоре после возникновения неустойчи-

ности и поддерживается, пока неустойчивость существует. Показательно, что центром деформации является именно та область, где расположена вершина потенциального горба. В этой же области оказываются локализованными и флуктуации потенциала (рис.5а). Таким образом, область потенциального максимума, или максимума шира, является центром неустойчивости.

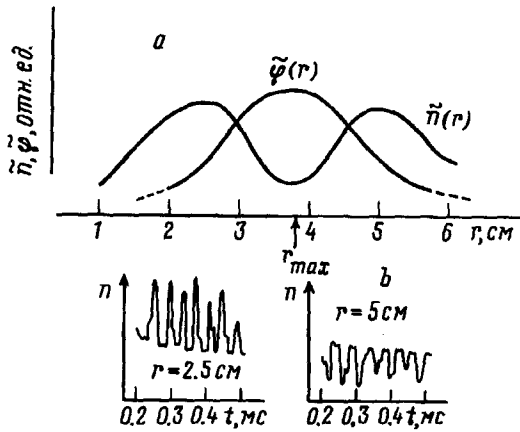


Рис.5. Флуктуации плотности плазмы: а - расположение максимумов флуктуаций плотности и потенциала ( $U = 120$  В); б - различие характера флуктуаций плотности во внутреннем и внешнем максимумах распределений  $\tilde{n}(r)$

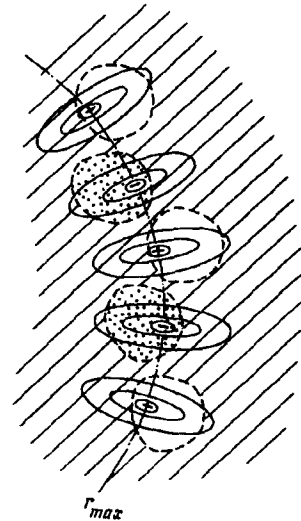


Рис.6. Схема относительного расположения в поперечном сечении возмущений плотности (сгущений и разрежений) и потенциала при сильно развитой неустойчивости (знаками  $+$  и  $-$  помечены возмущения потенциала, точками заполнены области сгущений)

Наряду с флуктуациями потенциала, в области неустойчивости наблюдаются также глубокие флуктуации плотности ( $\tilde{n}/n \approx 1$ ), характер которых, однако, имеет примечательные отличия. Во-первых, пространственная локализация этих флуктуаций двойственна, а именно, профиль зависимости амплитуды от радиуса  $\tilde{n}(r)$  является двугорбым, один горб смещен внутрь от центра неустойчивости, другой - наружу, рис.5а. Во-вторых, сам характер флуктуаций в этих горбах неодинаков. Во внутреннем горбе они имеют вид выбросов вверх над некоторым базовым уровнем, во внешнем - вид провалов вниз, рис.5б. Таким образом, с внутренней стороны от центра неустойчивости обнаруживаются сильные сгущения, с внешней - глубокие разрежения. Детальные зондовые измерения показали, что типичный поперечный размер возмущения составляет 1.5 - 2 см, то есть речь идет о больших номерах азимутальных мод ( $m \approx 10$ ). В продольном направлении возмущения являются желобковыми ( $k_{||} \ll \pi/L$ ). Между флуктуациями плотности и потенциала в фиксированной точке (точнее - на фиксированной магнитной силовой линии) имеется противофазная корреляция. Таким образом, мгновенная картина расположения

возмущений плотности и потенциала в поперечном сечении в районе неустойчивости выглядит примерно так, как изображено на рис.6 (с той оговоркой, что в реальности чередование возмущений может быть не столь упорядоченным). Все возмущения бегут в ионную сторону со скоростью около  $1 \cdot 10^5$  см/с, но успевают сместиться лишь на один – два своих размера, так как их время существования непродолжительно, масштаба 30 мкс.

4. Обсуждение. Описанные черты обнаруженной неустойчивости заставляют предположить, что это, вероятно, неустойчивость типа Рэля [6], то есть, в расширенной терминологии, неустойчивость Кельвина–Гельмгольца для случая, когда перепад скорости между слоями имеет характер не разрыва, а размытой ступеньки. Ориентиром для такой идентификации служит то обстоятельство, что для рэлеевской неустойчивости требуется существование на профиле скорости точки перегиба  $V'' = 0$ , здесь же такая точка налицо (вершина потенциального горба) и, как видно, именно она является центром локализации неустойчивости. По-видимому, следует говорить о рэлеевской неустойчивости существенно горячей плазмы, то есть с включением эффекта КЛР, поскольку в описанных опытах величина ионного ларморовского радиуса (3 мм) сопоставима с характерным размером шира скорости (8 мм). Очевидно также, что наблюдаемая картина соответствует поздней, сильно нелинейной стадии, поскольку относительные величины возмущений,  $\tilde{\varphi}/\varphi$  и  $\tilde{n}/n$ , сопоставимы с единицей. Видимые сгустки и разрежения, скорее всего, представляют вихри, как это неоднократно предсказывалось теорией и численным моделированием. Тот факт, что положения сгустков совпадают по азимуту с отрицательными возмущениями потенциала (рис.6), подсказывает, что каждому сгустку, по-видимому, присуще внутреннее радиальное электрическое поле, направленное к его центру, то есть вращение плазмы внутри сгустка происходит в электронную сторону. Аналогичным образом, вращение в разрежении происходит в ионную сторону. К сожалению, эти и другие детали, выявленные в опыте, сейчас не с чем сравнить, так как отсутствует какая-либо теоретическая модель, представляющая НКГ в ее сильно нелинейной стадии в условиях, подобных условиям ПР-8.

Встает также обязательный вопрос о том, почему сгустки и разрежения раздвинуты в шахматном порядке относительно центра неустойчивости, тогда как, по аналогии с гидродинамикой, более естественной казалась бы просто их прямая цепочка. Уверенного объяснения этому пока нет. Можно предположить, что раздвижение как-то связано с первоначальным спадом плотности в плазменном столбе по радиусу. Однако такое предположение малоубедительно, поскольку при развитой неустойчивости спад плотности в районе расположения возмущений исчезает (рис.4). Более оправданным представляется объяснение, основанное на том обстоятельстве, что плазменный столб находится не в простом соленоиде, а в ловушке, имеющей (благодаря каспам) положительный запас устойчивости относительно классической желобковой МГД моды. Это, как известно, означает, что всякое уплотнение в столбе будет вталкиваться внутрь, а разрежение – выталкиваться наружу, что и проявляется в наблюдаемом расположении возмущений.

О возможной природе плазменных потерь, вызываемых неустойчивостью, можно сказать следующее. Как показывают предварительные наблюдения, эти потери связаны не с продольным уходом, а с поперечным переносом наружу. Очевидно, образование локальных сгущений и разрежений само по себе не со-

здает крупномасштабного переноса. Вероятно, отвечающий за потери перенос возникает за счет стохастического дрейфа плазмы в не вполне регулярных азимутальных электрических полях, связанных с описанными возмущениями потенциала. Примечательно, что этот перенос простирается в наружную сторону далеко за пределы области, в которой флуктуации сохраняют большую величину.

Возвращаясь к началу, к токамакам, следует задать вопрос, не может ли обсуждаемая неустойчивость появиться в токамачном шнуре, в его периферийном слое с сильным широм, где, по имеющимся данным [10], найдется подходящая точка с  $V'' = 0$ . Вопрос о возможном возникновении НКГ на границе шнура рассматривался в некоторых работах и получил в общем утвердительный ответ [11, 12]. Но необходимо подчеркнуть, что по сравнению с описанными опытами на ПР-8 условия в токамаке весьма отличны: спиральное магнитное поле, магнитный шир, значительное  $\beta$ , гораздо меньшая относительная величина ионного ларморовского радиуса и др. Поэтому трудно сказать, в какой степени сообщенные здесь результаты могут быть отнесены к токамаку. Но с открытыми магнитными ловушками, такими как амбиполярные или газодинамические, у ПР-8 больше общего, и опасность возникновения данной неустойчивости в них может оказаться реальной, если радиальный профиль потенциала будет почему-либо немонотонным.

Авторы глубоко признательны А.В.Тимофееву и В.В.Арсенину за ценное обсуждение и поправки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (96-02-19312) и частично ISF (N 6E300).

- 
1. A.Mase, J.H.Jeong, A.Itakura et. al., Phys. Rev. Lett. **64**, 2281 (1990).
  2. O.Sakai, Y.Yasaka, and R.Itatani, Phys. Rev. Lett. **70**, 4071 (1993).
  3. B.Song and A.K.Sen, Phys. Rev. Lett. **72**, 92 (1994).
  4. В.В.Питерский, Е.Е.Юшманов, А.Н.Яковец, Письма в ЖЭТФ **62**, 283 (1995).
  5. S.Chandrasekhar, *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Oxford, U.P., 1961.
  6. А.Б.Михайловский, *Теория плазменных неустойчивостей* **2**, гл.7, М.: Атомиздат, 1971.
  7. D.L.Jassby, Phys. Fluids **15**, 1590 (1972).
  8. N.Sckopke et. al., J. Geophys. Res. **86**, 2099 (1981).
  9. А.А.Кабанцев, С.Ю.Таскаев, Физика плазмы **16**, 700 (1990).
  10. P.Gohil, K.H.Burrell, E.J.Doyle et. al., Nucl. Fusion **34**, 1057 (1994).
  11. T.Chiueh, P.W.Terry, P.H.Diamond et. al., Phys. Fluids **29**, 231 (1986). Bruce D.Scott, P.W.Terry, P.H.Diamond, Phys. Fluids **31**, 1481 (1988).
  12. H.R.Strauss, Nucl. Fusion **32**, 2021 (1992).