

УДК 533.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТОРВАННОЙ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАЗМЫ В ГОЛ-NB С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ГАЗА

© 2024 г. В. В. Поступаев\*, В. И. Баткин, И. А. Иванов, К. Н. Куклин, Н. А. Мельников,  
К. И. Меклер, А. Ф. Ровенских, Е. Н. Сидоров

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

\* e-mail: V. V. Postupaev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 01.12.2023 г.

После доработки 10.12.2023 г.

Принята к публикации 10.12.2023 г.

Магнитная система открытой ловушки обычно включает секции расширителей, расположенные между магнитными пробками с сильным полем и торцевыми поверхностями, которые принимают плазму. В установке ГОЛ-NB низкотемпературная стартовая плазма в области удержания создается дуговой плазменной пушкой, которая расположена в одном из расширителей. Параметры слоя приповерхностной плазмы влияют на электрический контакт области удержания с торцами и, тем самым, влияют на вклад эффекта в замороженности силовых линий магнитного поля в торец в устойчивость плазмы и на продольные потери из ловушки. На установке ГОЛ-NB были проведены эксперименты с дополнительной инжекцией водорода в плазменную пушку. Наблюдалось формирование области излучающей плазмы, оторванной от торцевой поверхности, которая по визуальным проявлениям соответствует аналогичному образованию в переизлучающих диверторах токамаков. В обоих случаях стандартного и оторванного режимов работы, распадающаяся плазма существует вблизи приемных электродов и после прекращения разрядного тока в течение всего времени наблюдения. В центральной ловушке ГОЛ-NB, некоторые структуры в Фурье-спектрограмма магнитных флуктуаций проявляются раньше и имеют более низкие частоты с оторванной плазмой, чем в стандартном режиме. Такие структуры ассоциируются с возбуждением мод типа перестановочных из-за потери стабилизирующего вклада замороженностью силовых линий в проводящий торец. Наблюдающийся отклик плазмы на дополнительный газонапуск подтверждает существующее понимание того, что стабилизация замороженностью является основным механизмом, обеспечивающим устойчивость центральной области плазмы во время первоначального накопления плазмы в центральной ловушке.

*Ключевые слова:* отрыв плазмы от поверхности, дивертор, линейная ловушка, многопробочная ловушка, ГОЛ-NB

DOI: 10.31857/S0367292124020021, EDN: SCXLHF

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение свойств плазмы, оторванной от поверхности, являются важной частью исследовательских программ многих экспериментальных установок, связанных с термоядерной программой (см., напр., обзор [1] и недавние работы [2–14]). В этом тексте мы будем использовать определение “плазмы, оторванной от поверхности” из [15] как “состояние, в котором наблюдаются большие градиенты полного давления плазмы (статические и динамические) параллельно магнитному полю со следствием в виде уменьшения мощности потока плазмы и ионов на ограничивающие поверхности”. Основной целью таких исследований является развитие физики и технологии переизлучающего дивертора, который обеспечит безопасную работу приемных пластин дивертора в термоядерном реакторе. Для линейных систем удержания плазмы (открытых ловушек различных типов) проблемы тепловой на-

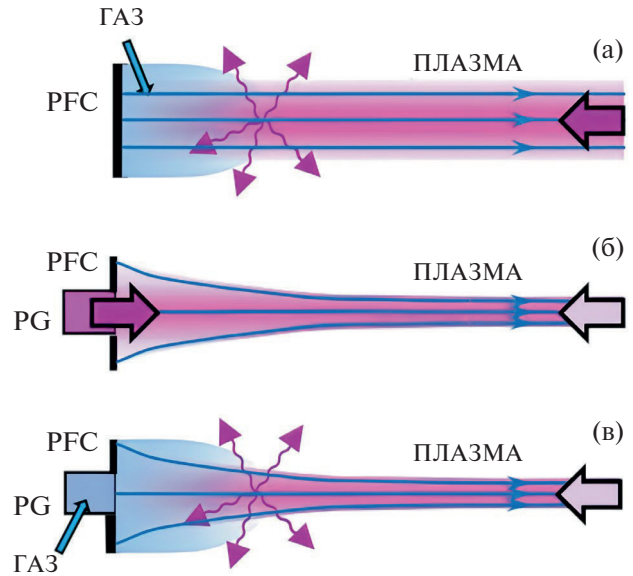
грузки на торцевые приемные пластины являются менее серьезными. Проекты существующих [16–20] и предложенных [21–24] открытых ловушек обычно включают специальные концевые секции, в которых магнитное поле постепенно ослабляется по направлению к стенке. Подобные секции обычно называются расширителями. В расширителе диаметр силовой трубки магнитного поля возрастает по направлению к стенке, и плотность мощности в потоке вытекающей из ловушки плазмы соответственно снижается. Линейная топология открытых ловушек позволяет проектировать достаточно простые расширители с коэффициентом расширения до нескольких сотен и эффективной откачкой.

В дополнение к задаче приема мощности потока плазмы, расширители выполняют две другие важные функции в открытых ловушках. Плазма имеет там прямой электрический контакт с приемной стенкой. С одной стороны, это вносит вклад в стабилизацию

плазмы в ловушке из-за эффекта вмороженности силовых линий магнитного поля (см., напр., [25, 26]). С другой стороны, холодные электроны приповерхностной плазмы могут ускоряться амбиполярным электрическим полем к области удержания, которая обычно имеет положительный потенциал. Поток холодных электронов с торца может приводить к усиленным продольным потерям и деградации удержания. Для устранения такого эффекта используются расширители с достаточно высоким коэффициентом ослабления магнитного поля,  $K \gg (m_i/m_e)^{1/2}$ . Если это условие выполнено, то приток холодных электронов в ловушку может быть подавлен (см., напр., [27–29]). Переход к режиму с отрывом плазмы от поверхности означает существенное изменение роли этих факторов.

Наш интерес к исследованию режима с отрывом плазмы от поверхности (detachment — детачмент) связан с задачей обеспечения устойчивости и термоизоляции плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-NB [18, 30]. Основной сценарий эксперимента заключается в начальном заполнении центральной ловушки ГОЛ-NB низкотемпературной стартовой плазмой и последующего нагрева этой плазмы инжекцией нейтральных пучков. Стартовая плазма создается при помощи дуговой плазменной пушки, размещенной в одном из расширителей. На стадии нагрева плазмы требуется разорвать электрическую связь между плазмой и плазменной пушкой для того, чтобы уменьшить приток холодных электронов в область удержания. В этой статье представлены результаты по разрыву связи плазмы с поверхностью при помощи дополнительного напуска газа непосредственно в плазменную пушку. На рис. 1 показано различие между обычными экспериментами по изучению взаимодействия плазмы с поверхностью и нашим случаем. Обычно, поток плазмы приходит на приемную поверхность от внешнего источника — области удержания плазмы или специализированного источника плазмы, см. рис. 1а. Рисунки 1б и 1в показывают две последовательных стадии обсуждаемых экспериментов на ГОЛ-NB. Первоначально, плазменная пушка заполняет центральную ловушку через сильную магнитную пробку, поэтому силовые линии сходятся на рисунке. В то же самое время существует обратный поток плазмы на приемные пластины со стороны сильного поля; на рисунке он показан стрелкой с менее интенсивной заливкой. Результирующий отпечаток плазмы на поверхности приемных пластин больше, чем выходная апертура плазменной пушки. Вторая стадия эксперимента начинается после прекращения тока в плазменной пушке. Режим детачмента достигался путем варьирования продолжительности напуска газообразного водорода внутрь пушки. В этот период все еще существует обратный поток плазмы из ловушки.

Детали постановки эксперимента и диагностики описаны в следующей части статьи. После этого



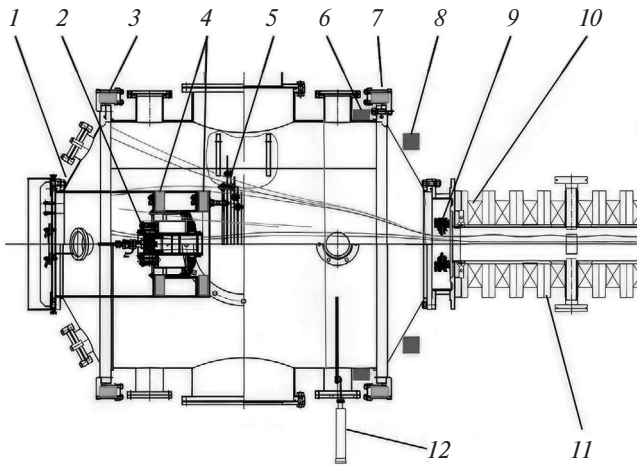
**Рис. 1.** Постановка типичного эксперимента по взаимодействию плазмы с поверхностью (а) и две стадии эксперимента по отрыву плазмы от поверхности на ГОЛ-NB: работа плазменной пушки (б) и последующий детачмент (в). Обозначение: PFC — поверхность, контактирующая с плазмой, PG — плазменная пушка, волнистые стрелки показывают излучающую область, сплошные линии схематично показывают ход силовых линий магнитного поля. Плазма и нейтральный водород показаны разным цветом.

представлены результаты измерений свойств плазмы в секции расширителя. Далее мы приводим данные по изменению устойчивости в режиме детачмента. Последним разделом является обсуждение и заключение.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДИАГНОСТИКИ

Установка ГОЛ-NB предназначена для изучения физики многопробочного удержания плазмы [18,30]. В полной конфигурации она состоит из центральной ловушки газодинамического типа, имеющей длину 2.5 м и магнитное поле в центре  $B = 0.3$  Тл, прилегающие к ней секции сильного поля длиной 3 м ( $B = 4.5$  Тл), а также концевые расширители магнитного потока. Внутри баков расширителей расположены торцевые плазмодриемники и плазменная пушка, которая является источником водородной плазмы [31]. Более детальное описание установки приведено в [32, 33].

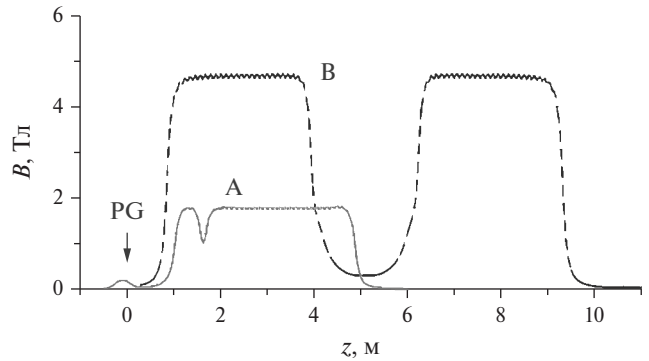
Данная статья посвящена процессам во входном расширителе в окрестности плазменной пушки. Схема этой части ГОЛ-NB показана на рис. 2. Вакuumный объем, в котором размещены плазменная пушка, торцевой плазмодриемник и входная лимитерная сборка, имеет диаметр 1 м. Плазменная пушка



**Рис. 2.** Секция входного расширителя ГОЛ-NB с плазменной пушкой. 1 — вакуумный объем, 2 — дуговая плазменная пушка, 3 и 7 — катушки расширителя, 4 — катушки плазменной пушки, 5 — секционированный плазмодриемник, 6 и 8 — катушки подстройки поля в расширителе, 9 — лимитерная сборка, 10 — крайняя катушка секции сильного поля, 11 — секция сильного поля, 12 — точка расположения ленгмюровского зонда на  $z = 0.54$  м. Продольная координата  $z$  отсчитывается от анода плазменной пушки.

обычно работает в магнитном поле 0.1—0.2 Тл. Выходящий из пушки поток плазмы распространяется в сторону секции сильного поля, затем проходит сквозь нее и заполняет центральную ловушку. Поток плазмы является столкновительным, длина свободного пробега меньше характерных пространственных размеров. Большая часть плазмы отражается назад от области нарастающего магнитного поля [34]. Итоговый профиль плотности плазмы в области входного расширителя выглядит как плотное центральное ядро с диаметром, приблизительно соответствующим проходному отверстию в первом электроде плазмодриемника, окруженное менее плотным гало отраженной плазмы, которое распространяется вплоть до контакта с лимитером [31, 33].

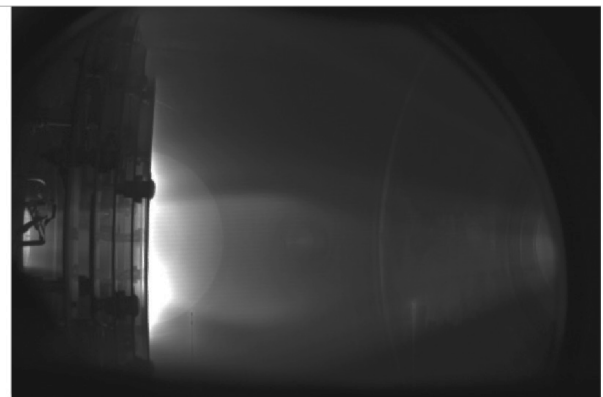
Эксперименты проводились при двух различных конфигурациях установки ГОЛ-NB. Соответствующие профили магнитного поля по длине показаны на рис. 3. В следующем разделе будут обсуждаться результаты изучения отрыва плазмы от поверхности, которые проводились во входном экспандере в стартовой конфигурации установки, представленной сплошной линией на рис. 3. Стартовая конфигурация включала оба расширителя и одну удлиненную секцию сильного поля между ними [34]. Из-за технических ограничений, максимальное поле в секциях сильного поля могло достигать 1.8 Тл. Вторая серия экспериментов была посвящена влиянию детачмента на устойчивость плазмы в центральной ловушке. Эта серия проводилась в полной проектной конфигурации ГОЛ-NB [32, 33] при поле 4.5 Тл



**Рис. 3.** Профили магнитного поля по длине в стартовой (А) и полной (В) конфигурациях ГОЛ-NB. Стрелка с меткой PG показывает положение плазменной пушки.

в секциях сильного поля (штриховая линия на рис. 3). Конфигурации А и В различаются также продолжительностью тока разряда в плазменной пушке (2.0 и 2.7 мс соответственно).

Основной диагностикой в этих экспериментах были два подвижных несимметричных двойных ленгмюровских зонда. Зонды располагались на  $z = 0.20$  и  $0.54$  м, см. рис. 4. Зонды были подключены к компактной системе управления и сбора данных, имевшей батарейное питание; они работали под плавающим потенциалом. Следует отметить две особенности функционирования зондов вблизи плазменной пушки. Первой из них являлось разрушение измерительных проволочек зондов большим током в случае, если измерялась электронная ветвь



1 2 3 4

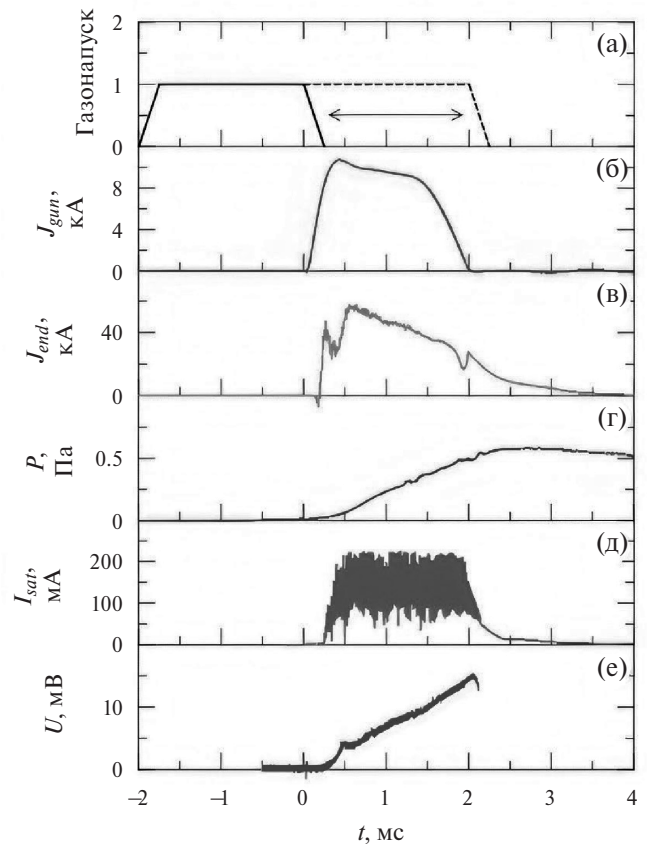
**Рис. 4.** Фотография свечения плазмы вблизи пушки, полученная с широкоугольным объективом при первичном обезгаживании ленгмюровских зондов разрядом. Обозначения: 1 — вид пяти колец входного плазмодриемника сбоку, канал разряда виден в зазорах между кольцами, 2 и 3 — ленгмюровские зонды на  $z = 0.20$  и  $0.54$  м, 4 — переход к секции сильного поля. Прочие объекты правильной геометрической формы являются элементами конструкции камеры.



вольт-амперной характеристики (ВАХ) в этих конкретных точках. Второй особенностью являлась глубокая относительно высокочастотная модуляция тока на проволочки, вызывавшаяся токовыми филаментами в разряде, вращающимися вокруг оси из-за  $E \times B$ -дрейфа; подобная быстрая модуляция затрудняла проведение надежных измерений ВАХ в каждом разряде. Оба обстоятельства привели к необходимости упрощения измерительной головки зонда по сравнению с первоначальной четырехэлектродной конструкцией [35], которая используется для измерения свойств стартовой плазмы в других частях установки ГОЛ-NB. В результате измерялись только ионный ток насыщения и потенциал плазмы относительно стенки. По этой причине прямые измерения динамики температуры плазмы отсутствуют. Вместо этого мы в качестве разумной оценки использовали данные о температуре плазмы, полученные при помощи четырехэлектродного зонда в более отдаленных от пушки сечениях плазмы. Далее в тексте измеренный ионный ток насыщения будет пересчитываться в плотность плазмы с использованием простой модели [36] в предположении о том, что на стадии распада плазмы ее температура близка к 2 эВ. В проверочных экспериментах, обсуждавшихся в [35], была продемонстрирована пригодность модели [36] для определения параметров плазмы как в течение основного времени работы плазменной пушки, так и в течение некоторого времени после ее выключения на стадии распада плазмы. Дополнительная инжекция газа в экспериментах по детачменту, обсуждаемых в этой статье, существенно изменяет условия, в которых работает зонд, включая температуру и концентрацию нейтрального газа, динамика которых неизвестна. Это делает используемую теоретическую модель формально неприменимой. Тем не менее для целей данной статьи мы решили использовать во всех случаях одну и ту же теоретическую модель для того, чтобы исключить неопределенность, связанную с произвольным выбором модели для плохо известных экспериментальных условий. Далее мы с этим пониманием будем использовать значения плотности плазмы вместо необработанных сигналов тока зонда для визуализации различий в динамике сигналов после прекращения тока разряда в плазменной пушке. Во избежание неоднозначности такую величину мы будем называть модельной плотностью.

### 3. СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ, ОТОРВАННОЙ ОТ ПОВЕРХНОСТИ

В этом разделе представлены результаты, полученные в стартовой конфигурации ГОЛ-NB (сплошная линия на рис. 3). В этой конфигурации поток плазмы транспортировался сквозь секцию сильного поля и поглощался выходным приемником плазмы, накопления плотности не происходило. Рис. 5 показывает типичный сценарий экспери-



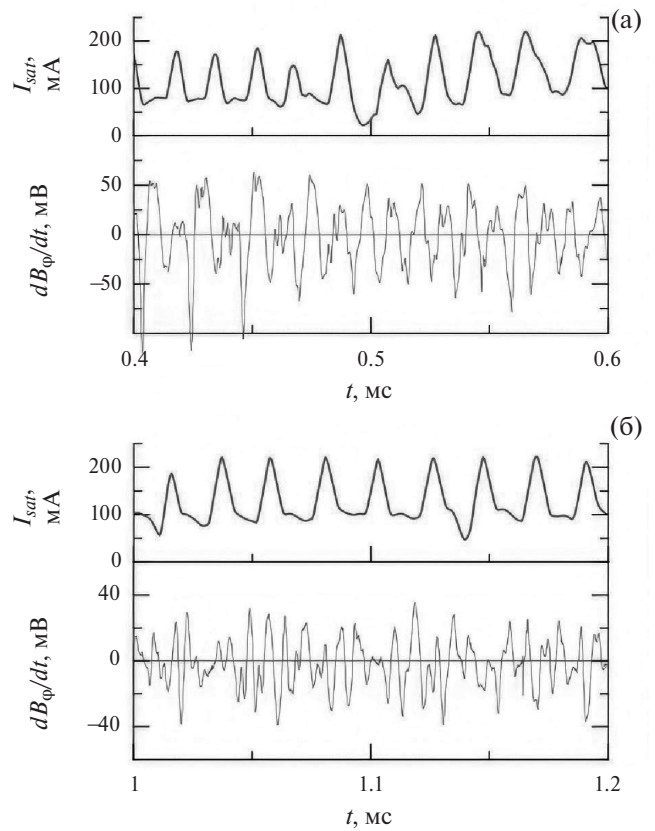
**Рис. 5.** Сценарий эксперимента и типичные осциллограммы в эксперименте NB4333 в стартовой конфигурации ГОЛ-NB (случай А на рис. 3), сверху вниз: диаграммы открытого состояния газового клапана в стандартном режиме с  $t_{gas} = 2$  мс (сплошная линия) и с дополнительным газонапуском (штриховая линия), ток плазменной пушки  $J_{gun}$ , ток на центральный электрод выходного плазмоприемника  $J_{end}$ , давление газа в расширителе с плазменной пушкой  $P$ , ионный ток насыщения лентгмюровского зонда  $I_{sat}$ , сигнал фотодиода, расположенного в секции сильного поля  $U$ .

мента в стандартном режиме с оптимизированным напуском газа в плазменную пушку. Напуск водорода начинается в момент времени  $t = -2.0$  мс и продолжается в течение  $t_{gas} = 2.0$  мс (сплошная линия на рис. 5а). Продолжительность газонапуска совпадает с длительностью тока разряда в пушке. Для напуска используется клапан [37] с временем открытия 0.25 мс. В этом случае, практически не остается лишнего газа в объеме плазменной пушки после завершения разряда. В обсуждаемых экспериментах по детачменту, длительность газонапуска  $t_{gas}$  была увеличена по сравнению со стандартным режимом при использовании тех же газового клапана и прочего оборудования. Штриховая линия на рис. 5а схематично показывает увеличенную длительность газонапуска.

Форма и длительность тока разряда в плазменной пушке  $J_{gun}$  определяются параметрами питаю-

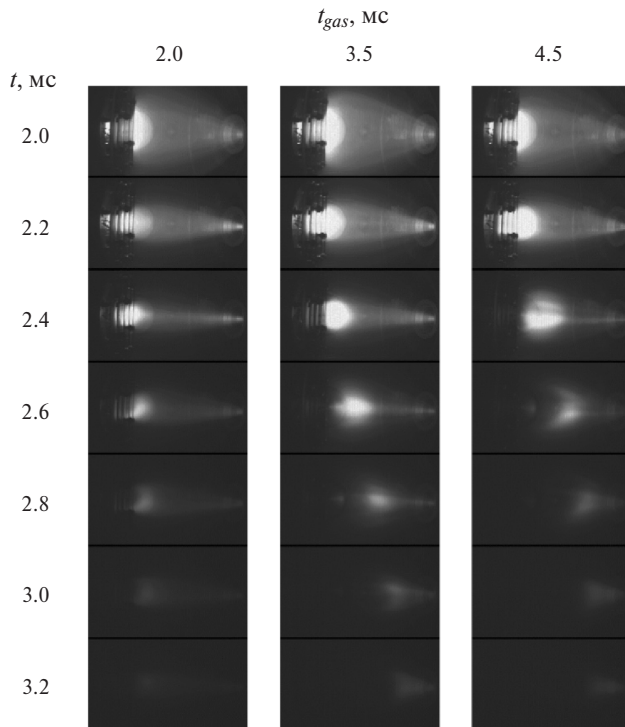
щей высоковольтной формирующей линии. Они практически не завясят от параметров газонапуска при условии, что есть достаточная плотность газа для начального пробоя. Ток на центральный электрод выходного плазмодриемника  $J_{end}$  появляется с задержкой на время пролета. Давление газа во входном расширителе  $P$ , измерявшееся на стенке бака, постепенно увеличивается в течение времени работы пушки. Ток ионного насыщения ленгмюровского зонда  $I_{sat}$  демонстрирует упомянутую особенность разряда. Он имеет сильную модуляцию в течение разряда. Это означает, что локальные параметры плазмы имеют сильную модуляцию. Тем не менее за исключением этой модуляции параметры потока плазмы стабильны во времени. В [35] были измерены значения электронной температуры, усредненной по серии экспериментов, отдельно для пиков  $T_e \approx 13$  эВ и для промежутков  $T_e \approx 7$  эВ (величины приведены для  $t \approx 1.5$  мс). Модуляция локальных параметров плазмы обусловлена, скорее всего, пространственной неоднородностью плотности тока разряда, которая вызывает пространственную неоднородность потока плазмы. Из-за  $E \times B$ -вращения плазмы зонд регистрирует такую пространственную неоднородность как периодическую модуляцию измеряемого тока. Можно отметить, что модуляция сигналов зонда исчезает после прекращения тока разряда; плазма на стадии распада является более спокойной. Нижний сигнал на рис. 5 показывает динамику излучения плазмы в секции сильного поля, измеренного калориметрическим фотодиодом со спектральной областью чувствительности от ближнего инфракрасного (NIR) до экстремального ультрафиолетового (XUV) излучения. Его динамика соответствует постепенному увеличению концентрации нейтралов при постоянных концентрации и температуре плазмы.

На рис. 6 показано сравнение быстрой модуляции сигналов ленгмюровского зонда и катушки, измерявшей  $dB_\phi/dt$  вблизи стенки камеры в секции сильного поля на  $z = 2.68$  м. Для интерпретации сигналов на рисунке важным является то, что зонд производит измерение локальных параметров плазмы, а катушкой измеряются флуктуации азимутального магнитного поля, генерируемого продольными токами, протекающими по плазме и имеющими некую пространственную структуру. Видно, что наиболее низкочастотные модуляции ионного тока насыщения практически необнаружимы на сигналах датчика магнитного поля, которые определяются более высокочастотными процессами, с большой вероятностью локализованными на периферии. Из рис. 6 можно сделать вывод о том, что флуктуации, измеряемые магнитным датчиком, вызваны плазменными процессами, а не начальной модуляцией плазменного потока в пушке.



**Рис. 6.** Высокочастотная модуляция ионного тока насыщения ленгмюровского зонда  $I_{sat}$  и сигнала катушки, измерявшей  $dB_\phi/dt$  на  $z = 2.68$  м, показанная для двух фрагментов сигналов в эксперименте NB4333 (том же, что на рис. 5).

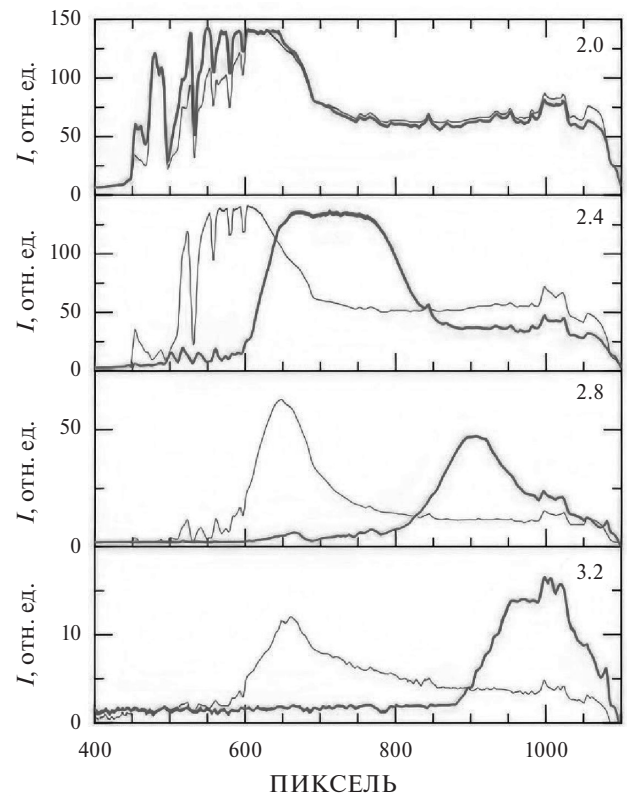
На рис. 7 представлены три набора кадров из скоростных видео, сделанных для случаев стандартного газонапуска (левая колонка) и режимов с детачментом (центральная и правая колонки). Поле зрения аналогично приведенному на рис. 4. Во всех трех случаях ток разряда в пушке прекращался в  $t = 2.0$  мс. В стандартном режиме плазма все время остается в контакте с поверхностью. Средняя колонка соответствует режиму, в котором подача газа прекращается в  $t = 1.5$  мс во время работы пушки. Затухающий канал разряда виден в зазорах между электродами плазмодриемника вплоть до  $t = 2.4$  мс. После этого яркая излучающая область плазмы отрывается от поверхности плазмодриемника; излучающая плазма поддерживается в течение некоторого времени обратным потоком плазмы из секции сильного поля. Правая колонка соответствует эксперименту с еще более увеличенным газонапуском и более ранним детачментом плазмы. При отрыве плазмы от поверхности явно видна темная зона между пластинами плазмодриемника и излучающей плазмой. Далее в этом разделе мы будем сравнивать свойства плазмы в двух режимах при  $t_{gas} = 2$  и 3.5 мс.



**Рис. 7.** Динамика излучения плазмы в трех разрядах с различной длительностью газонапуска  $t_{gas}$  при начальном давлении в клапане 0.5 МПа. Случай с  $t_{gas} = 2$  мс является стандартным режимом, показанным сплошной линией на рис. 5а. Момент начала каждого кадра показан слева, длительность экспозиции 7 мкс.

Сравнение профилей яркости вдоль магнитной оси для стандартного режима и режима с отрывом плазмы от поверхности приведено на рис. 8 для четырех пар кадров из рис. 7, взятых для случаев  $t_{gas} = 2$  и 3.5 мс. Из-за дисторсии широкоугольного объектива координата вдоль оси  $x$  нелинейна, поэтому на рисунке в качестве координаты  $x$  используется номер колонки ПЗС-матрицы. Излучение собирается вдоль линий наблюдения, которые имеют различные углы относительно оси. Следует отметить также, что резкие изменения яркости в изображениях вызваны изменениями коэффициента отражения от противоположной стенки камеры и, на координатах  $x < 600$ , электродами плазмодиагностики. При обработке производилось вычитание темных кадров. После этого проводилось усреднение сигнала по четырем смежным рядам ПЗС-матрицы для того, чтобы уменьшить шумы преобразования заряда ячеек ПЗС в цифровой формат. Другой обработки сигналов не производилось.

В момент прекращения разрядного тока в  $t = 2.0$  мс профили яркости для этих двух режимов практически совпадают для  $x > 600$ , т. е. в свободном пространстве за электродами плазмодиагностики. В то же время, можно заметить меньшую яркость

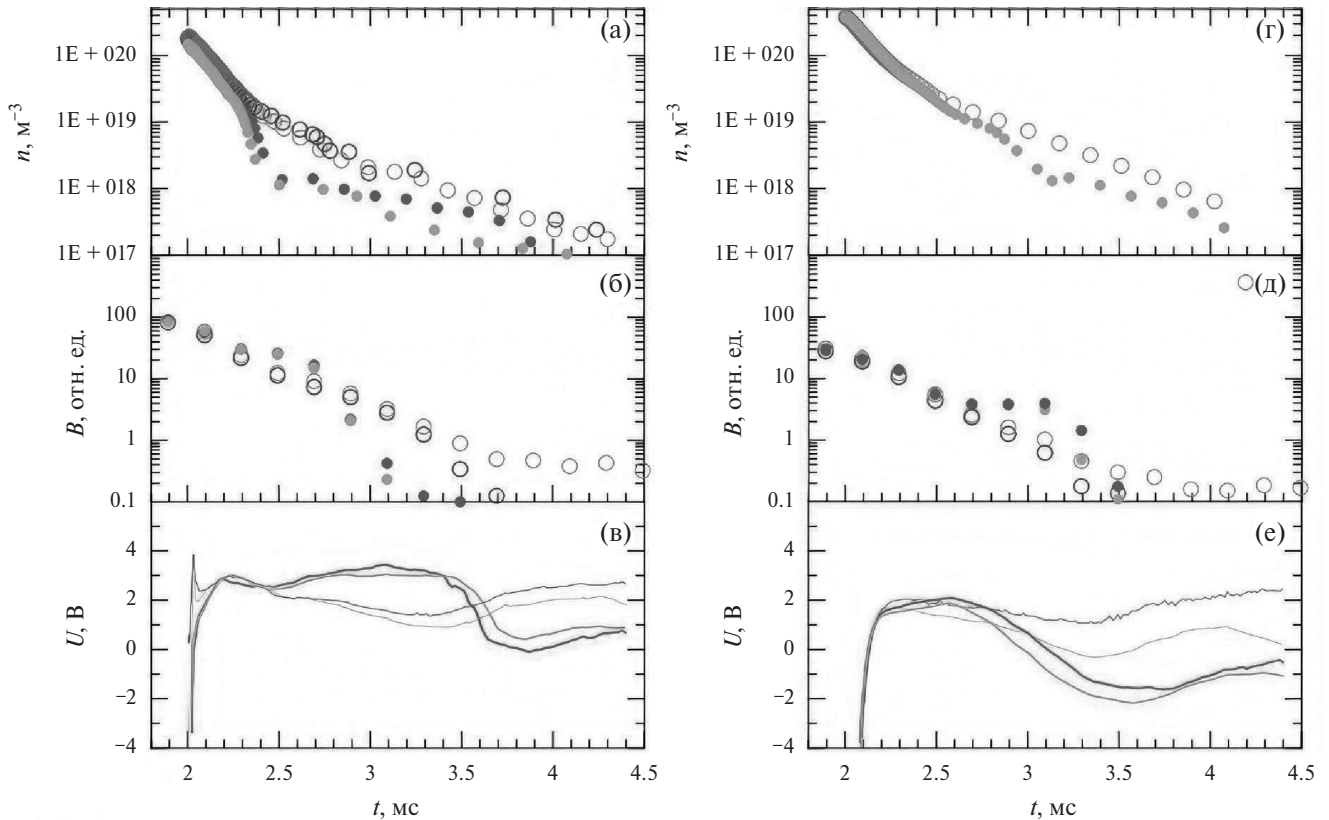


**Рис. 8.** Профили яркости изображения плазмы вдоль магнитной оси для некоторых кадров из рис. 7. Толстыми линиями показан режим детачмента с  $t_{gas} = 3.5$  мс (средняя колонка на рис. 7); тонкие линии соответствуют стандартному режиму с  $t_{gas} = 2$  мс. Метки обозначают начало каждого кадра в миллисекундах.

внутри разрядного канала при  $x < 600$  в режиме стандартного газонапуска. Это естественным образом объясняется истощением водорода к концу разряда в стандартном режиме. В режиме детачмента, более продолжительный напуск газа обеспечивает более высокую плотность в пушке к концу разрядного тока. Отрыв яркого плазмоида от поверхности плазмодиагностики происходит в  $t \approx 2.4$  мс при  $t_{gas} = 3.5$  мс. После этого излучающая плазма движется в сторону сильной магнитной пробки. Видно, что в этих двух режимах яркость свечения вблизи поверхности плазмодиагностики отличается на порядок.

Скоростное видео показывает существенное снижение яркости плазмы около стенки в режиме детачмента. В этой области плазма излучает в видимом спектре в основном линии водорода. При низких температурах вклад в излучение дают процессы возбуждения электронным ударом и рекомбинации. Вероятным объяснением уменьшения локальной яркости свечения плазмы может быть уменьшение локальной плотности плазмы во время дополнительной инъекции газа в точку наблюдения. В слабоионизированной плазме баланс давления определяется в том числе и нейтральными части-





**Рис. 9.** Динамика параметров плазмы при стандартной работе и в режиме детачмента, измеренных на  $z = 0.20$  м (слева) и  $0.54$  м (справа). Сверху вниз: модельная плотность из зондовых измерений  $n$ , яркость плазмы в точке расположения зонда  $B$ , потенциал плазмы  $U$ . Сплошные точки и толстые линии соответствуют режиму детачмента с  $t_{gas} = 3.5$  мс (средняя колонка на рис. 7); окружности и тонкие линии относятся к стандартному режиму с  $t_{gas} = 2$  мс. Экспериментальные данные, полученные в разные дни, отличаются интенсивностью цвета.

цами. Зондовые измерения показали, однако, более сложную эволюцию параметров плазмы. На рис. 9 показана динамика параметров плазмы для двух положений ленгмюровских зондов на  $z = 0.20$  и  $0.54$  м для двух режимов, соответствующих левой и средней колонкам рис. 7. На рисунке цветом разной интенсивности показаны данные, полученные в разные экспериментальные дни для того, чтобы продемонстрировать воспроизводимость результатов. Так же, как и в случае видеорегистрации, наблюдается приход дополнительного водорода в точку наблюдения.

Перед прекращением тока разряда, который достигает  $J_{gun} \approx 10$  кА, плазма имеет большой отрицательный потенциал, который определяется электрическим контактом с катодом плазменной пушки. После этого плазма в расширителе приобретает естественный положительный потенциал порядка температуры электронов, который составляет около 2 эВ в распадающейся плазме (части (в) и (е) рис. 9). В стандартном режиме этот положительный потенциал сохраняется все время распада плазмы. Следует отметить, что прекращение подачи тока в цепь питания плазменной пушки не означает мгновенного прекращения всех токов в плазме; не-

которые петлеобразные структуры тока могут существовать в течение некоторого времени. Остаточные токи обеспечивают утечку электрического заряда к электродам и наблюдаемые изменения потенциала плазмы. В отключенном режиме поступление плотного газа в точку наблюдения при  $z = 0.54$  м (рис. 9в) приводит к смене полярности на отрицательную. На более близкой координате  $z = 0.20$  м аналогичное влияние газа на потенциал начинается в более поздний момент времени  $t \approx 3.4$  мс (рис. 9е). Перед этим, однако, наблюдается некоторое увеличение положительного потенциала по сравнению со стандартным режимом.

Скоростное видео в целом коррелировало с измерениями потенциала (части (б) и (г) рис. 9). Все существенные изменения в динамике потенциала соотносятся с изменениями в динамике яркости, с оговоркой относительно сбора света вдоль наклонной линии наблюдения видеокамеры. Сначала яркость увеличивается, когда газ поступает в точку наблюдения, а затем плотность возбуждающих электронов уменьшается и наблюдается уменьшение яркости.

Данные зонда Ленгмюра показаны на частях (а) и (г) рис. 9. Наблюдается уменьшение ионного тока

насыщения на порядок, когда при  $t \approx 2.3$  мс газ поступал в место расположения зонда на  $z = 0.20$  м (рис. 9а, измеренный ток был пересчитан в модельную плотность). Незадолго до этого поток энергии из плазменной пушки был заблокирован плотным газом. Разница между стандартной работой и режимом детачмента максимальна при  $t \approx 2.5$  мс, а затем происходит некоторое восстановление сигнала датчика. В месте проведения измерений вторым зондом на  $z = 0.54$  м аналогичные процессы происходят с задержкой во времени.

Сравнение осциллограмм на рис. 9 показывает, что изменение яркости плазмы более выражено, чем изменение ионного тока насыщения (два и один порядок величины, соответственно). Это можно объяснить предположением, что электроны из “хвоста” функции распределения, которые обладают достаточной энергией для возбуждения атома водорода в месте расположения зонда Ленгмюра, уже были предварительно замедлены в излучающей плазме, оторванной от поверхности.

Причина наблюдаемого частичного восстановления зондирующего сигнала после значительного первоначального падения при  $t \approx 2.5$  мс на рис. 9а на данный момент неясна. В течение этого периода система не имеет внешнего питания, подаваемого на плазму. Обычная теория ленгмюровских зондов аппроксимирует ток насыщения ионами следующим образом.

$$I_{sat} \approx \alpha n e A \sqrt{T_e / M}, \quad (1)$$

где  $\alpha \approx 0.6$  (см, напр., [38]),  $A$  — площадь зонда,  $n$ ,  $e$ ,  $T_e$  и  $M$  — плотность, элементарный заряд, электронная температура и масса иона соответственно. Подборка видеок кадров на рис. 7 показывает, что оторвавшаяся от поверхности излучающая плазма все еще движется вперед в течение этого времени. Следовательно, простое увеличение локальных параметров плазмы за счет потока энергии от основного плазменного столба маловероятно; отсутствие одновременного увеличения локальной яркости не подтверждает такое предположение. Вероятно, здесь мы столкнулись с методической особенностью работы зонда в изменяющихся условиях. Зонд Ленгмюра собирает ионный ток насыщения из некоторой плазменной оболочки, свойства которой варьируются в зависимости от локальных параметров плазмы и нейтральной популяции. Свойства плазменной оболочки скрыты в параметре  $\alpha$  в (1). Предположительно, изменение параметров оболочки из-за быстрого увеличения плотности газа может привести к наблюдаемому эффекту.

Измерения с помощью ленгмюровских зондов показывают, что некоторая значительная популяция заряженных частиц существует даже за излу-

чающей плазмой в режиме детачмента. Электропроводность в этой области определяется столкновениями электронов с нейтральными частицами, плотность которых превышает плотность плазмы. Однако некоторая продольная электропроводность сохраняется на протяжении всего времени наблюдения. Существующая теория МГД-стабилизации плазмы за счет эффекта вмороженности силовых линий в торец предполагает, что вблизи поверхности плазмоприемника существует достаточно плотная плазма. Эффект вмороженности силовых линий в торец не обеспечивает истинной стабилизации; это только подавляет инкремент неустойчивости. Плотность стабилизирующей плазмы  $n_s$  должна быть достаточно большой по сравнению с плотностью удерживаемой плазмы  $n_c$  [25, 26]

$$\frac{n_s}{n_c} > \frac{\Lambda m^2 c_s v_i}{\omega_{ci}^2 r_c^2}, \quad (2)$$

где  $\Lambda \geq 10$  — требуемое уменьшение инкремента неустойчивости,  $m$  — азимутальное волновое число,  $r_c$  — радиус удерживаемой плазмы, остальные обозначения стандартны. В стандартном режиме работы плазменной пушки происходит постепенная потеря стабилизирующего эффекта приповерхностной плазмы в результате уменьшения ее плотности. В режиме детачмента потеря стабилизирующих качеств может происходить быстрее из-за ухудшения продольной проводимости за счет столкновений с нейтральными частицами.

#### 4. МАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-NB

Ограниченная серия экспериментов с работой плазменной пушки в режиме детачмента была проведена в полной проектной конфигурации ГОЛ-NB. Конфигурация отличалась от рассмотренной в предыдущем разделе наличием центральной ловушки и второй соленоидальной секции после нее, а также увеличенным магнитным полем в соленоидах до 4.5 Тл — см. линию В на рис. 3. В целом режим работы плазменной пушки был близок к показанному на рис. 5, за исключением увеличения продолжительности тока разряда с 2.0 до 2.7 мс и аналогичного увеличения продолжительности подачи газа в стандартном режиме. Остальные параметры эксперимента были такими же, как обсуждались в предыдущем разделе. В центральной ловушке не использовалась инъекция нейтральных пучков. Магнитная активность плазмы изучалась с помощью двух датчиков. Первый измерял все три составляющие магнитного поля вблизи средней плоскости центральной ловушки на  $z = 5.00$  м. Вторым датчиком измерял азимутальную составляющую магнитного поля в секции сильного поля на  $z = 2.35$  м. Оба дат-



чика имеют многovitковые измерительные катушки, защищенные заземленными электростатическими экранами из 20-микронной нержавеющей фольги.

На рис. 10 показаны данные с азимутальной катушки, расположенной на  $z = 5.00$  м в центральной ловушке. Данные с радиальной и осевой катушек выглядят аналогично, но содержат больше цифрового шума из-за меньших амплитуд сигналов. На части (а) рисунка показан типичный сигнал  $dB_\phi/dt$ , измеренный в стандартном режиме. Он начинается, когда плазма поступает в центральную ловушку, и имеет большую амплитуду до тех пор, пока ток разряда в плазменной пушке не начнет значительно уменьшаться. Во время этой сильноточной части разряда магнитный сигнал модулирован аналогично показанному на рис. 6. После этого амплитуда сигнала значительно уменьшается, но он по-прежнему пригоден для анализа Фурье.

Части (б) и (в) рис. 10 показывают фурье-спектры сигналов  $dB_\phi/dt$  в стандартном режиме и при

детачменте. Для целей данной статьи была выбрана специальная форма представления результатов Фурье-анализа, которая позволяет построить график спектрального состава сигнала с одинаковым качеством как во время основной фазы разряда, так и после его окончания. Полный набор данных из 32К измерений был разделен на 63 интервала по 1024 точки, последовательно сдвинутых во времени на 512 точек. Затем для каждого набора данных был выполнен анализ Фурье с весовой функцией Ханна, которая имеет вид

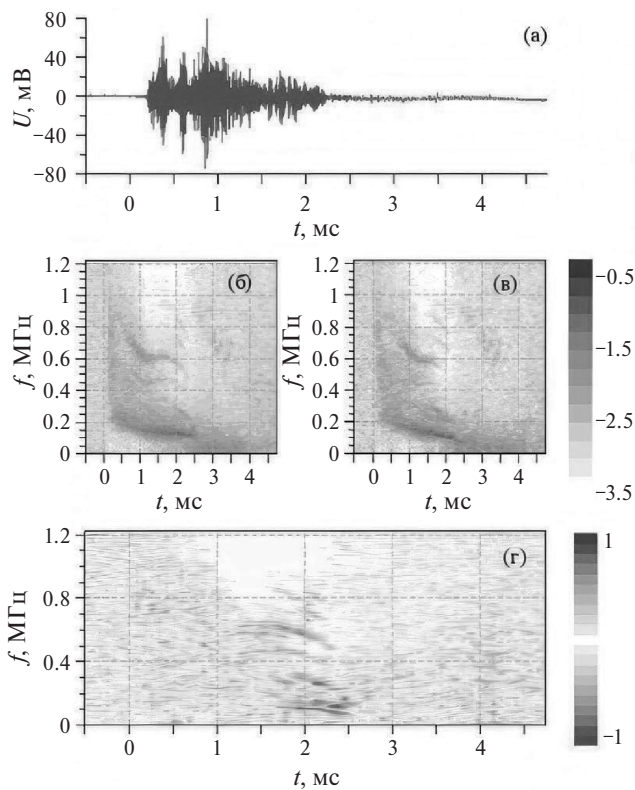
$$\omega(n) = \sin^2\left(\frac{\pi n}{N}\right), \quad 0 \leq n \leq N, \quad (3)$$

где  $N = 1023$  в нашем случае. После этого проводилась нормализация спектров Фурье:

$$\hat{f}_{n,norm} = \hat{f}_n / \sum_{k=1}^{N/2} \hat{f}_k, \quad (4)$$

где  $\hat{f}_n$  — амплитуда  $n$ -й гармоники Фурье. Десятичный логарифм этой величины приведен на рис. 10. При таком определении, случай  $\hat{f}_{n,norm} = 1$  соответствует наличию единственной спектральной гармоники в сигнале, вне зависимости от ее амплитуды.

Часть (г) рис. 10 показывает разницу в магнитных флуктуациях в двух режимах работы. Видно, что колебания наибольшей физической амплитуды с частотами в диапазонах 0.1–0.2 и 0.6–0.7 МГц, связанные с особенностями работы плазменной пушки, практически исчезают на разностной спектрограмме. Наиболее выраженной особенностью разностного спектра являются моды флуктуаций с частотами в диапазоне от 0.1 до 0.9 МГц, которые возникают на стадии уменьшения разрядного тока в плазменной пушке. Частота этих мод постепенно уменьшается со временем и происходит переход максимальной амплитуды к модам с наименьшей частотой. Эти моды соответствуют, скорее всего, возмущениям типа перестановочных мод с разными азимутальными номерами, которые вращаются вместе с плазмой из-за  $E \times B$ -дрейфа. Такая идентификация основана на следующем. Изображения плазмы, сделанные с длительностью экспозиции 7 мкс, показывает типичный рисунок из более ярких и темных полос, выстроенных вдоль магнитного поля, которые начинают формироваться в конце разрядного тока. При большей длительности экспозиции изображение размывается из-за вращения плазмы. Радиальное электрическое поле специально создается системой лимитеров и торцевых плазموприемников, на которые подается напряжение смещения плазмы (подробности см. в [32, 33]); это поле было непосредственно измерено в [34] в той же конфигурации и режиме работы, что и представленные в разд. 3. В режиме детачмента обсуждаемые



**Рис. 10.** Спектры магнитных флуктуаций на  $z = 5.00$  м. (а) — типичный необработанный сигнал азимутальной катушки, (б) — десятичный логарифм нормализованной Фурье-спектрограммы в стандартном режиме работы с  $t_{gas} = 2.8$  мс, (в) — то же самое в режиме детачмента с  $t_{gas} = 5.8$  мс, (г) — разница между (б) и (в). Здесь разница в единицу соответствует разнице амплитуд нормализованных гармоник Фурье в 10 раз; синий цвет — амплитуда выше в стандартном режиме, красный цвет — амплитуда выше в режиме детачмента.

магнитные флуктуации возникают раньше и имеют меньшую частоту, что может быть связано с худшей трансляцией электрического потенциала вдоль магнитного поля при дополнительной подаче газа в конце разряда.

Во время основной части разряда в плазменной пушке происходит постепенное накопление плазмы в центральной ловушке, см. рис. 6 в [32]. Рост плотности прекращается примерно в то же время, когда на магнитных сигналах появляются признаки перестановочных мод. Условие стабилизации в замороженностью силовых линий в торец (2) в какой-то момент нарушается при постепенном снижении плотности плазмы в стандартном режиме. В режиме детачмента дестабилизация плазмы происходит раньше из-за худшей электропроводности плазмы расширителя.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены две серии экспериментов с дополнительным напуском водорода в плазменную пушку при различных конфигурациях магнитной открытой ловушки ГОЛ-NB. Вблизи плазменной пушки наблюдалось появление оторванной от поверхности излучающего плазменного образования, которое визуальное соответствует таковому в излучающих диверторах в токамаках. Прямые измерения зонда *in situ* показали, что изменения в динамике ионного тока насыщения зонда меньше, чем изменения видимой яркости этой области при переключении в режим детачмента. Как в стандартном режиме, так и в случае детачмента распадающаяся плазма существовала вблизи приемных электродов в течение всего времени наблюдения после прекращения тока разряда.

Измерения спектра магнитных флуктуаций в центральной ловушке ГОЛ-NB показали, что в режиме детачмента некоторые структуры на фурье-спектрограмме магнитных флуктуаций с частотами в диапазоне 0.1–0.9 МГц проявляются раньше, чем в стандартном режиме, и имеют более низкие частоты. Мы связываем эти структуры в магнитных флуктуациях с появлением перестановочных мод из-за потери стабилизации плазмы замороженностью силовых линий в проводящий торец. В целом наблюдаемое поведение плазмы в режиме детачмента подтвердило наше понимание эффекта замороженности как основного фактора, стабилизирующего центральную область плазмы на начальной фазе накопления плотности в центральной ловушке. В физическом проекте ГОЛ-NB предполагается, что метод вихревого удержания [38] будет использоваться для стабилизации плазмы, нагретой нейтральным пучком, во время основной фазы эксперимента, подробности см. в [18, 33].

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Сооружение и эксплуатация установки ГОЛ-NB финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Изучение устойчивости плазмы в ГОЛ-NB проводится при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-12-00133; <https://rscf.ru/en/project/21-12-00133/>.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boedo J., McLean A. G., Rudakov D. L., and Watkins J. G., *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 044008 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aaa2ec>
2. Cavedon M., Kurzan B., Bernert M., et al., *Nucl. Fusion* **62**, 066027 (2022). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac6071>
3. Feng Y., Jakubowski M., König R., et al., *Nucl. Fusion* **61**, 086012 (2021). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac0772>
4. Guo X., Tanaka H., Kajita S., Ohno N., Hattori S., and Sawada K., *Plasma Fusion Res.* **17**, 2402027 (2022). <https://doi.org/10.1585/pfr.17.2402027>
5. Islam M. S., Nakashima Y., Hatayama A., et al., *Plasma Fusion Res.* **14**, 2402016 (2019). <https://doi.org/10.1585/pfr.14.2402016>
6. Ješko K., Marandet Y., Bufferand H., Gunn J. P., van der Meiden H. J., and Ciraolo G., *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 125009 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aae80d>
7. Kang I. J., Bae M.-K., Park I. S., et al., *J. Korean Phys. Soc.* **80**, 717 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40042-022-00397-y>
8. Leonard A. W., *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 044001 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aaa7a9>
9. Mukai K., Masuzaki S., Hayashi Y., et al., *Nucl. Fusion* **61**, 126018 (2021). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2bbc>
10. Perillo R., Chandra R., Akkermans G. R. A., Classen I. G. J., Korving S. Q., and Magnum-PSI Team, *Phys. Plasmas* **26**, 102502 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5120180>
11. Pitts R. A., Bonnin X., Escourbiac F., et al., *Nucl. Mater. Energy* **20**, 100696 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.100696>
12. Shoshin A. A., Arakcheev A. S., Arzhannikov A. V., et al. *Fusion Eng. Design* **114**, 157 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.12.019>

13. Soukhanovskii V. A., Allen S. L., Fenstermacher M. E., et al., *Nucl. Fusion* **58**, 036018 (2018).  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aaa6de>
14. Wang L., Wang H. Q., Eldon D., et al., *Nucl. Fusion* **62**, 076002 (2022).  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac4774>
15. Matthews G. F., *Nucl. J. Mater.* **220**, 104 (1995).  
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(94\)00450-1](https://doi.org/10.1016/0022-3115(94)00450-1)
16. Gota H., Binderbauer M. W., Tajima T., et al., *Nucl. Fusion* **61**, 106039 (2021).  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2521>
17. Li Q., Zhu G., Ren B., Ying J., Yang Z., and Sun X., *Plasma Sci. Technol.* **25**, 025102 (2023).  
<https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac8e45>
18. Postupaev V. V., Batkin V. I., Beklemishev A. D., et al., *Nucl. Fusion* **57**, 036012 (2017).  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/57/3/036012>
19. Sudnikov A. V., Beklemishev A. D., Postupaev V. V., Burdakov A. V., Ivanov I. A., Vasilyeva N. G., Kuklin K. N., and Sidorov E. N., *Fusion Eng. Design* **122**, 86 (2017).  
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.09.005>
20. Yakovlev D. V., Shalashov A. G., Gospodchikov E. D., Maximov V. V., Prikhodko V. V., Savkin V. Ya., Soldatkina E. I., Solomakhin A. L., and Bagryansky P. A., *Nucl. Fusion* **58**, 094001 (2018).  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aacb88>
21. Сковородин Д. И., Черноштанов И. С., Амиров В. Х., и др., *Физика плазмы* **49**, 831 (2023).  
<https://doi.org/10.31857/S0367292123600322>
22. Bagryansky P. A., Beklemishev A. D., and Postupaev V. V., *J. Fusion Energy* **38**, 162 (2019).  
<https://doi.org/10.1007/s10894-018-0174-1>
23. Bagryansky P. A., Chen Z., Kotelnikov I. A., Yakovlev D. V., Prikhodko V. V., Zeng Q., Bai Y., Yu J., Ivanov A. A., and Wu Y., *Nucl. Fusion* **60**, 036005 (2020).  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab668d>
24. Egedal J., Endrizzi D., Forest C. B., and Fowler T. K., *Nucl. Fusion* **62**, 126053 (2022).  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac99ec>
25. Prater R., *Phys. Fluids* **17**, 193 (1974).  
<https://doi.org/10.1063/1.1694587>
26. Molvik A. W., Breun R. A., Golovato S. N., Hershkowitz N., McVey B., Post R. S., Smatlak D., and Yujiri L., *Phys. Fluids* **27**, 2711 (1984).  
<https://doi.org/10.1063/1.864575>
27. Конкашбаев И. К., Ландман И. С., Улинич Ф. Р., *ЖЭТФ* **74**, 956 (1978).
28. Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shaposhnikov R. A., and Shalashov A. G., *Nucl. Fusion* **59**, 106004 (2019).  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2ef8>
29. Skovorodin D. I., *Phys. Plasmas* **26**, 012503 (2019).  
<https://doi.org/10.1063/1.5043072>
30. Postupaev V. V., Burdakov A. V., and Ivanov A. A., *Fusion Sci. Technol.* **68**, 92 (2015).  
<https://doi.org/10.13182/FST14-846>
31. Иванов И. А., Баткин В. И., Бурдаков А. В., и др., *Физика плазмы* **47**, 856 (2021).  
<https://doi.org/10.31857/S0367292121090031>
32. Postupaev V. V., Batkin V. I., Burdakov A. V., et al., *Nucl. Fusion* **62**, 086003 (2022).  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac69fa>
33. Иванов И. А., Полозова П. А., Баткин В. И., и др., *Физика плазмы* **49**, 1059 (2023).  
<https://doi.org/10.31857/S0367292123601030>
34. Postupaev V. V., Batkin V. I., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Ivanov I. A., Kuklin K. N., Mekler K. I., Rovenskikh A. F., and Sidorov E. N., *Plasma Phys. Control. Fusion* **62**, 025008 (2020).  
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab53c2>
35. Sidorov E. N., Batkin V. I., Burdakov A. V., Ivanov I. A., Kuklin K. N., Mekler K. I., Nikishin A. V., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., *J. Instrum.* **16**, T11006 (2021).  
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/T11006>
36. Laframboise J. G., *Theory of Spherical and Cylindrical Langmuir Probes in a Collisionless, Maxwellian Plasma at Rest*. Ph. D. Thesis (Toronto Univ. Downsview (Ontario) Inst. for Aerospace Studies. University of Toronto, Toronto, Canada, 1966).
37. Деревянкин Г. Е., Дудников В. Г., Журавлев П. А., *ПТЭ* **18** (No. 5), 168 (1975).
38. Chen F. F., *Langmuir probe diagnostics*, in Proc. Mini-Course on Plasma Diagnostics, IEEE ICOPS meeting (June 5, 2003, Jeju, Korea), p. 20—111.
39. Beklemishev A. D., Bagryansky P. A., Chaschin M. S., Soldatkina E. I., *Fusion Sci. Technol.* **57**, 351 (2010).  
<https://doi.org/10.13182/FST10-A9497>



## Detached Plasma Studies in GOL-NB with Extra Gas Injection

© 2024 V. V. Postupaev<sup>a,\*</sup>, V. I. Batkin<sup>a</sup>, I. A. Ivanov<sup>a</sup>, K. N. Kuklin<sup>a</sup>, N. A. Melnikov<sup>a</sup>,  
K. I. Mekler<sup>a</sup>, A. F. Rovenskikh<sup>a</sup>, and E. N. Sidorov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia*  
\* *e-mail: V.V.Postupaev@inp.nsk.su*

The magnetic system of an open trap usually includes expansion sections located between highfield magnetic mirrors and end surfaces that receive plasma. In the GOL-NB device, an arc plasma gun is located in one of the expanders, which creates a low-temperature starting plasma in the confinement area. The parameters of the surface plasma sheath affect the electrical connection of the confinement area with the walls and, thereby, affect the contribution of the line-tying effect to the plasma stability and the longitudinal energy losses from the trap. The experiments with additional hydrogen injection into the plasma gun were carried out at GOL-NB. We observed a radiating plasma formation detached from the surface, which visually corresponds to that in radiating divertors in tokamaks. In both standard and detached modes, decaying plasma existed near the receiving electrodes during the entire observation time after the discharge current was terminated. In the central trap of GOL-NB, some structures in the Fourier spectrogram of magnetic fluctuations manifest earlier in the detachment mode than in the standard mode and have lower frequencies. We associate these structures with the onset of interchange-like modes due to the loss of plasma stabilization by the line-tying to the conducting ends. The observed plasma response to the additional gas supply confirmed our understanding of the line-tying effect as the main factor stabilizing the plasma core in the initial phase of density accumulation in the central trap.

*Keywords:* plasma detachment, divertor, linear device, multiple-mirror trap, GOL-NB