

УДК 533.9

ИНИЦИИРОВАНИЕ РАЗРЯДА В ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М2 И КТМ С ПОМОЩЬЮ КОАКСИАЛЬНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

© 2021 г. А. В. Воронин^а, В. Ю. Горяинов^{а, д, *}, В. К. Гусев^а, В. Б. Минаев^а,
А. Н. Новохацкий^а, Ю. В. Петров^а, Н. В. Сахаров^а, Е. Г. Жилин^б,
Б. Ж. Чектыбаев^с, Е. А. Сарсембаев^с, А. Д. Садыков^с, А. Т. Кусаинов^с

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

^б Общество с ограниченной ответственностью Иоффе Фьюжн Текнолоджи, С.-Петербург, Россия

^с Филиал Института атомной энергии, Министерства энергетики Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

^д Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: vgorainov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 13.03.2021 г.

После доработки 06.04.2021 г.

Принята к публикации 06.04.2021 г.

Проведены исследования возможности применения коаксиального ускорителя плазменной струи для облегчения пробоя и старта тока плазмы в токамаках Глобус-М2 и КТМ. Результаты экспериментов по инъекции струи в токамак Глобус-М2 с магнитным полем 0.7 Тл показали, что ток в разряде начинал свой рост на 1–2 мс раньше по сравнению с началом роста тока при использовании газонапуска и индукционного пробоя рабочего газа. При этом напряжение пробоя уменьшалось до 2 раз. Результаты экспериментов по инъекции плазменной струи через экваториальный патрубок в токамак КТМ с магнитным полем 0.9 Тл показали, что пробой происходил до 6 мс раньше по сравнению с разрядом, создаваемым чисто индукционным способом. При этом происходило снижение напряжения на обходе в 1.5 раза. Практически во всех случаях с ускорителем достигался пробой, в то время как при его отсутствии в некоторых случаях пробой отсутствовал совсем.

Ключевые слова: пробой рабочего газа, формирование разряда, плазменный ускоритель, токамак

DOI: 10.31857/S0367292121080114

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология пробоя рабочего газа, заполнение плазмой, а также оптимизация сценария разряда — актуальные задачи, решение которых необходимо для эффективного управления параметрами токамака. Вихревого поля индуктора токамака часто бывает недостаточно для пробоя рабочего газа. В настоящее время применяются дополнительные методы формирования разряда, основанные на источниках ВЧ-излучения, плазменных струй, компактных торов [1–7] и др. Для гарантированного и управляемого пробоя газа правильнее всего использовать ВЧ-источники, работающие в режиме ЭЦ-резонанса. Для тороидального поля ~ 1 Тл частота волны накачки должна быть около 40–80 ГГц. К сожалению, известные магнетроны российского производства в этом диапазоне в штатных режимах работы с длительностью импульса несколько микросекунд оказались непригодными для целей предыонизации. Производимые гиротроны обладают избыточной мощностью (~ 1 МВт) и высокой стоимостью (1–2 доллара за 1 Ватт). Это ограничивает их

применение на небольших установках. Возможности эффективного инициирования разряда с помощью плазменной струи были ранее продемонстрированы экспериментально на токамаке Глобус-М с магнитным полем ≤ 0.4 Тл [8]. Также была произведена подпитка топливом токамака с помощью плазменной струи. В результате удалось увеличить плотность частиц на 30% в центральной области плазменного шнура без срыва тока [9].

Настоящая работа является продолжением исследований по разработке ускорителя плазмы с большой кинетической энергией и его применению на токамаках Глобус-М2 и Казахстанском материаловедческом токамаке (КТМ) с более высокими магнитными полями.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Исследование начальной фазы разряда, создаваемого с помощью коаксиального ускорителя плазменной струи в токамаках Глобус-М2 и КТМ проводилось при величине магнитного поля 0.7 и

Таблица 1. Основные параметры токамаков на момент проведения экспериментов

Параметр	Глобус-М2	КТМ
Большой радиус плазмы, м	0.36	0.9
Малый радиус плазмы, м	0.24	0.45
Объем плазмы, м ³	0.6	5
Тороидальное магнитное поле, Тл	0.7	0.9

0.9 Тл соответственно. Для сравнения основные параметры токамаков представлены в табл. 1.

Схема оригинального коаксиального ускорителя плазмы с конической вставкой в области формирования разряда представлена на рис. 1а. Диаметры наружного и центрального электродов составляли 46 и 10 мм соответственно, длина – 250 мм. Питание ускорителя осуществлялось с помощью емкостного накопителя 160 мкФ, напряжением до 5 кВ и током разряда до 120 кА. Напуск дейтерия под давлением 2.5 атм. осуществлялся через боковую поверхность наружного электрода на начальном участке ускорителя с помощью клапана электродинамического типа. Спустя 400 мкс после напуска газа инициировался разряд в ускорителе. Электрический разряд, проходящий через газ между коаксиальными электродами, обеспечивал ионизацию газа и ускорение плазмы. На рис. 1б представлены зависимости напряжения и тока разряда от времени. Видно, что общая длительность импульса, включая обратный полупериод тока, составляла ~24 мкс.

В камеру токамака Глобус-М2 инжестрировали дейтериевую струю плазмы в экваториальной плоскости в радиальном направлении со стороны слабого магнитного поля. Схема расположения ускорителя на токамаке представлена на рис. 2.

Количество инжектируемых частиц было сопоставимо с общим числом частиц в плазме токамака и составляло 10^{19} – 10^{20} . Поэтому ускоритель мог заполняться плазмой токамака Глобус-М2 и без дополнительного напуска рабочего газа. Расположение элементов плазменного ускорителя на токамаке Глобус-М2 представлено на рис. 3.

В ходе экспериментов были проведены измерения динамики роста тока плазмы, напряжения на обходе плазменного шнура, плотности плазмы, излучения плазмы на линиях D_{α} и СIII. Расположение диагностик указано на рис. 2а. На токамаке Глобус-М2 были задействованы следующие диагностики:

- пояс Роговского для измерения тока плазмы, погрешность составляла 3%;
- петля, проложенная в тороидальном направлении для измерения напряжения на обходе тора;
- СВЧ-интерферометр для измерения концентрации плазмы;
- кремниевые фотоприемники, снабженные интерференционными фильтрами, для измерения интенсивности излучения линий D_{α} и СIII (465 нм);
- магнитные петли, расположенные на поверхности вакуумной камеры для реконструкции крайней замкнутой магнитной поверхности;
- скоростная видеокамера для визуализации свечения плазмы в токамаке.

По величине излучения углерода определялся уровень примесей в разряде, так как внутренняя стенка камеры токамака была покрыта графитовыми пластинами. На стадии формирования разряда ионизация углерода за счет энергии плазменной струи могла приводить к увеличению радиационных потерь и, в свою очередь, к охлаждению и уменьшению проводимости плазмы.

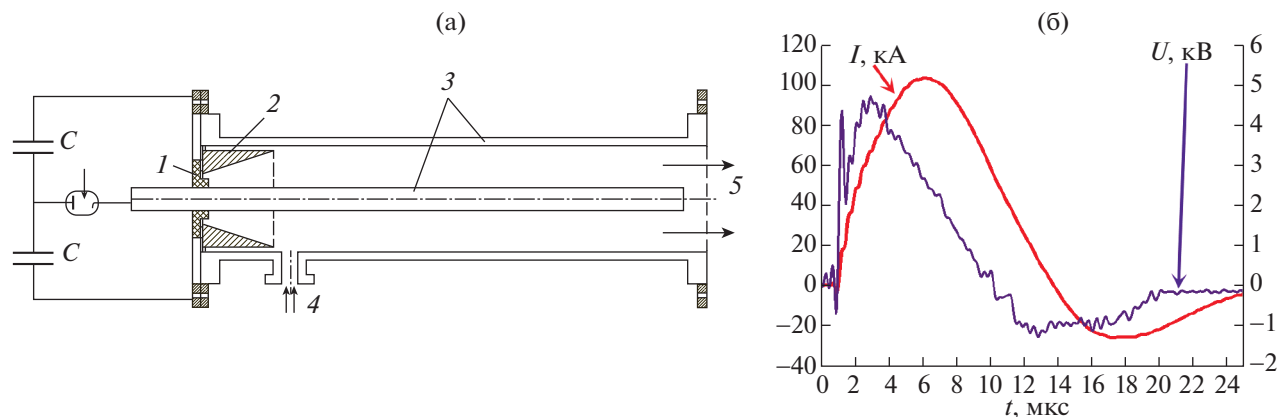


Рис. 1. Коаксиальный ускоритель плазмы – (а): 1 – керамика, 2 – коническая вставка, 3 – коаксиальный ускоритель, 4 – напуск газа электродинамическим клапаном, 5 – плазменная струя; зависимости напряжения U и тока I ускорителя от времени, погрешность измерений составляла 10% – (б).

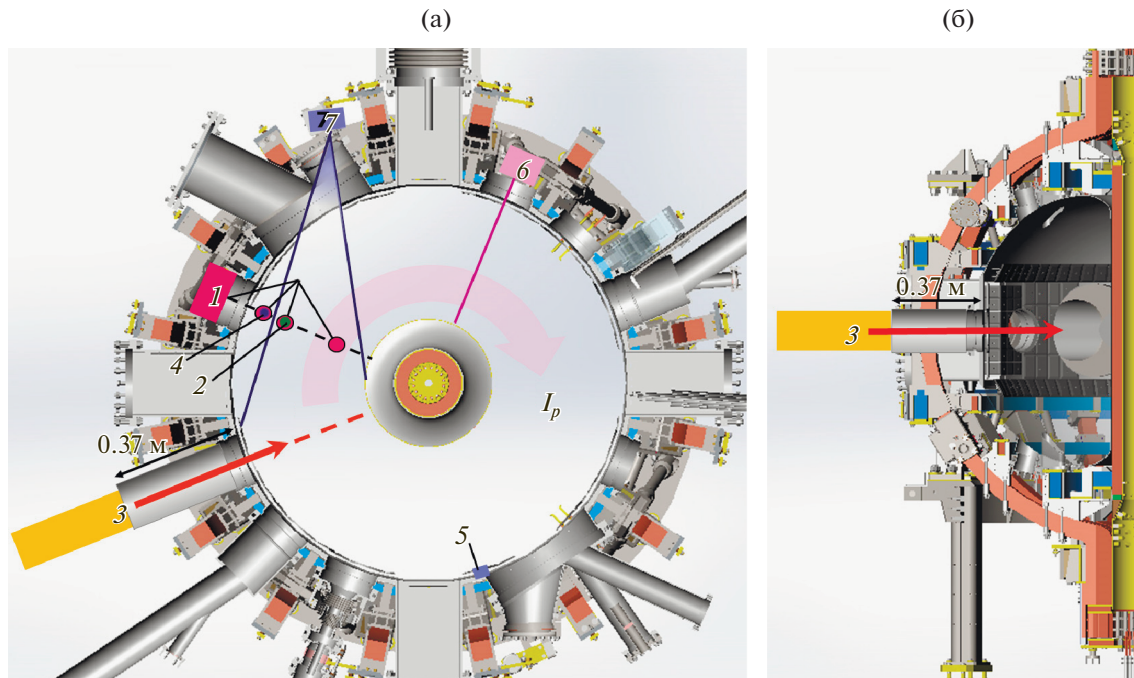


Рис. 2. Схема расположения ускорителя на токамаке Глобус-М2, (а) экваториальное сечение: 1 – СВЧ-интерферометр, 2 – измерение плотности плазмы, усредненной по хорде, 3 – плазменный ускоритель и направление плазменной струи, 4 – диагностика D_α , 5 – напуск газа пьезоклапаном, 6 – диагностика СПИ, 7 – видеокамера; (б) полоидальное сечение.

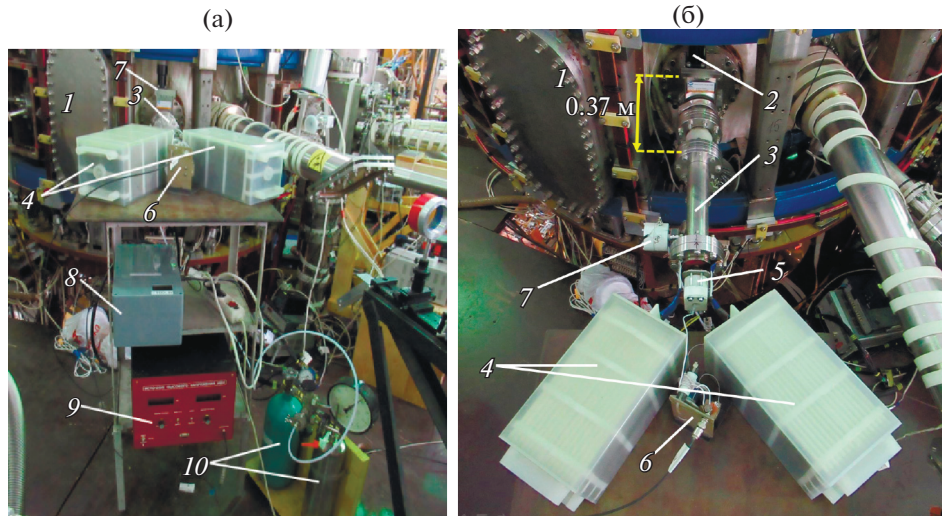


Рис. 3. Виды сзади (а) и сверху (б) элементов плазменного ускорителя, установленного на токамаке Глобус-М2: 1 – токамак, 2 – вакуумный шибер, 3 – коаксиальный ускоритель, 4 – конденсаторный накопитель, 5 – коммутатор тока, 6 – система запуска коммутатора тока, 7 – электродинамический клапан, 8 – источник питания клапана, 9 – зарядное устройство, 10 – система напуска рабочего газа.

мы. Это могло затруднять инициирование разряда в токамаке. Излучение D_α регистрировали с помощью приемника, расположенного на верхнем куполе с линией наблюдения вдоль вертикальной хорды, расположенной на периферии

плазменного шнура. Измерение усредненной плотности плазмы производили вдоль хорды, проходящей в вертикальном направлении и расположенной на расстоянии 42 см от оси тора. Алгоритм подвижных токовых колец [10] использо-

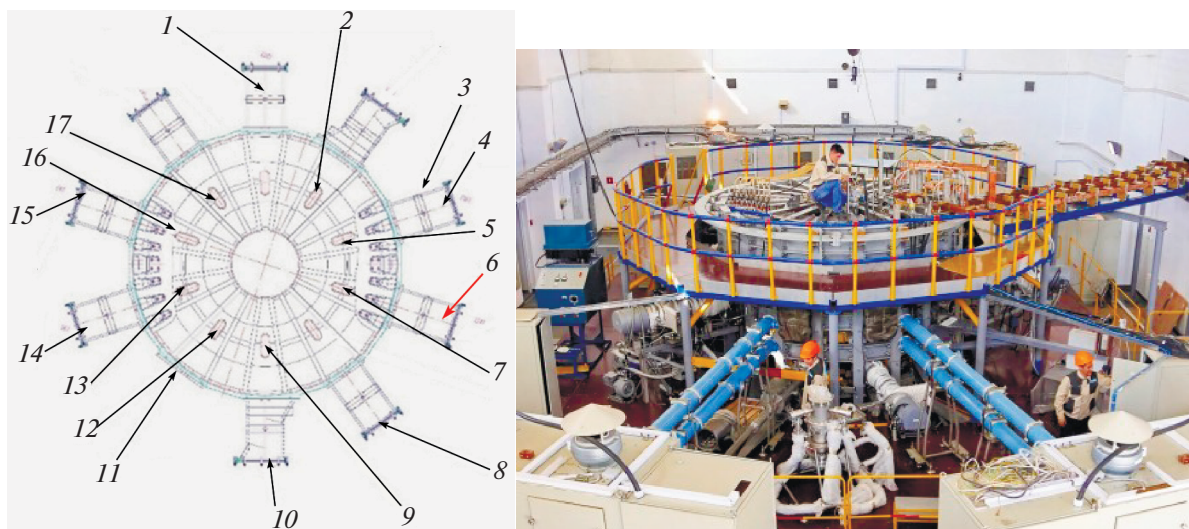


Рис. 4. Схема расположения систем на токамаке (слева) и вид токамака КТМ (справа). 1, 8 – вакуумная откачка через экваториальный патрубок, 2 – диагностика SXR, 3 – вакуумная откачка ДУ-320, 4, 14, 15 – экваториальная ВЧ-антенна, 5 – электрод системы тлеющего разряда, 6 – ускоритель плазменной струи, 7 – газонапуск, 9 – спектрометры H_{α} - D_{α} , 10 – рефлектометры, система предьонизации, 11 – AXUV-монитор 1, болометр, видеокамера, зонды, 12 – AXUV-монитор 2, 13 – спектрометр высокого разрешения, 16 – пирометр, ИК-монитор 1,2, 17 – пирометр, ИК-монитор 3,4.

вали для реконструкции крайней замкнутой магнитной поверхности. Кроме тока плазмы и токов в обмотках токамака входными данными были магнитные потоки, измеряемые петлями, расположенными на поверхности вакуумной камеры (всего использовалась 21 петля). Достоинством алгоритма являлась возможность реконструкции магнитных поверхностей при малых токах плазмы, что важно для исследования стадии пробоя разряда в токамаке и начальной фазы старта плазменного тока. Видеокамера располагалась в экваториальной плоскости тора и позволяла регистрировать эволюцию свечения плазмы в токамаке. Напуск рабочего газа в токамак осуществлялся с помощью пьезоэлектрического клапана, который располагался в экваториальной плоскости со стороны сильного магнитного поля (рис. 2а).

Схема расположения систем и вид токамака КТМ представлены на рис. 4. Исследования пробоя и ионизации рабочего газа на начальной фазе плазменного разряда в токамаке КТМ проводились поэтапно. На первом подготовительном этапе были проведены сборка и монтаж плазменного ускорителя на вакуумной камере. После чего были проведены предварительные испытания работы ускорителя с инжекцией плазменной струи в вакуумную камеру без использования обмоток электромагнитной системы. Затем были проведены испытания ускорителя плазменной струи в условиях тороидального магнитного поля со значением на оси тора 0.9 Тл. Далее проводились ис-

пытания ускорителя плазменной струи на сценариях плазменного разряда.

На рис. 5 показано размещение ускорителя на экваториальном патрубке КТМ.

В качестве рабочего газа использовался водород с чистотой 99.999%.

Для проведения исследований на токамаке КТМ были задействованы следующие диагностики:

- пояс Роговского для измерения тока плазмы;
- полнообходные петли для измерения напряжения на обходе;
- диагностика H_{α} для измерения интенсивности излучения линий водорода;
- обзорный болометр и AXUV монитор для измерения радиационных потерь плазмы;
- быстродействующая видеокамера для визуализации свечения плазмы в токамаке.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

На рис. 6а показано излучение струи плазмы, инжектированной в камеру токамака без магнитного поля. Видно, что по мере движения струи от патрубка ее свечение уменьшалось. Однако вблизи стенки камеры у центрального столба излучение вновь увеличилось, что вызвано взаимодействием потока частиц струи со стенкой. На рис. 6б видно излучение выходящей в камеру струи плазмы с тороидальным магнитным полем

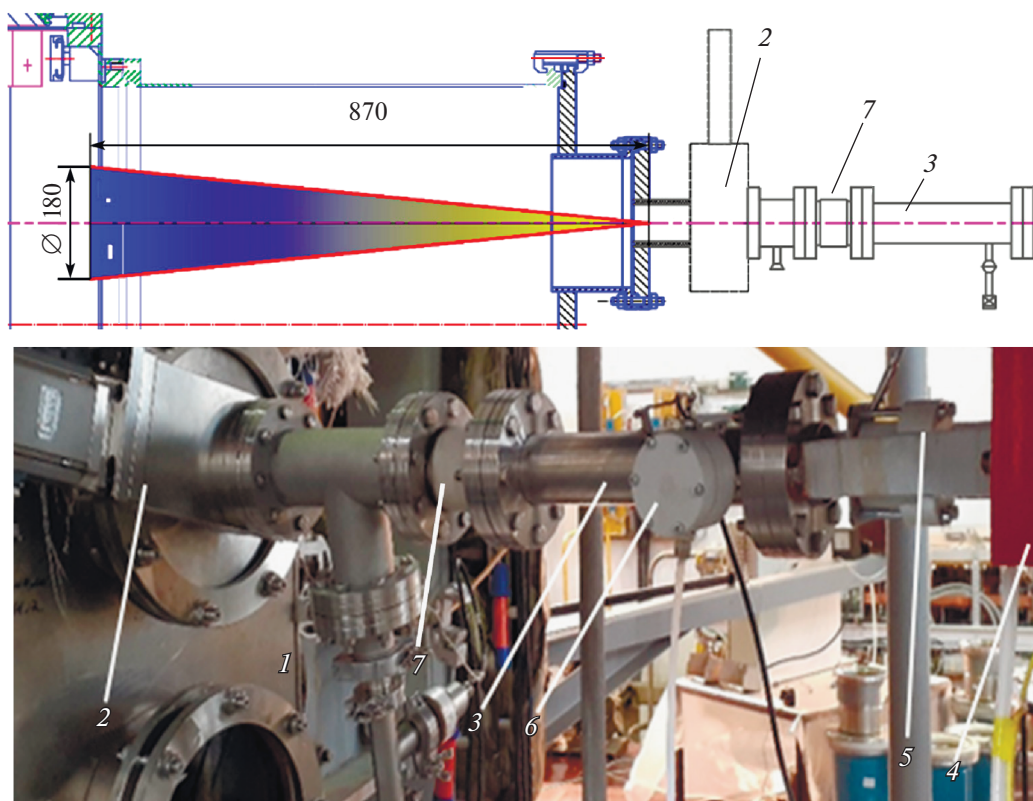


Рис. 5. Расположение ускорителя на экваториальной трубке КТМ: 1 – фланец патрубка; 2 – затвор; 3 – коаксиальный ускоритель; 4 – конденсаторный накопитель; 5 – коммутатор тока; 6 – электродинамический клапан, 7 – металлокерамический переход.

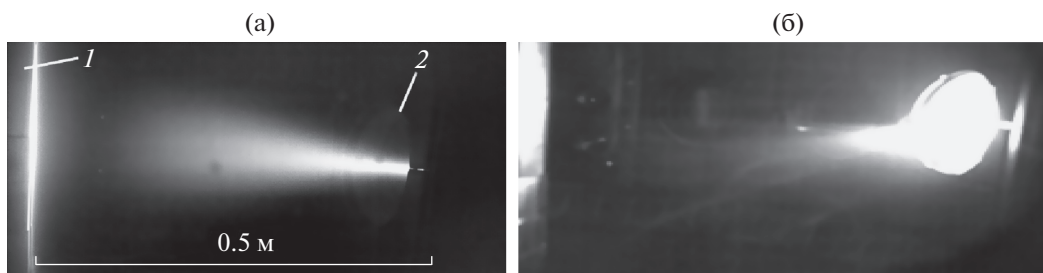


Рис. 6. Видеокadres плазменной струи, инжестрированной в камеру токамака (а) – без магнитного поля, 1 – центральная колонна, 2 – патрубок; (б) – с тороидальным магнитным полем 0.7 Тл. Время интегрирования 1.8 мс.

0.7 Тл. Обнаружено отклонение струи по направлению силовых линий поля. Тем не менее, струя могла влиять на развитие разряда в токамаке.

На рис. 7а показана эволюция параметров плазмы в экспериментах по формированию начальной фазы разряда с применением ускорителя плазменной струи. Напряжение на электродах ускорителя составляло 4.7 кВ, количество инжестрируемых частиц дейтериевой плазмы – 2×10^{20} . Для сравнения на рисунке приведены зависимости параметров разряда в условиях чисто индук-

ционного пробоя рабочего газа. Количество частиц нейтрального дейтерия в этом случае также составляло 2×10^{20} . Видно, что напряжение пробоя в разряде с использованием плазменной струи уменьшилось с 6.1 до 3.1 В по сравнению с разрядом, инициируемым только индукционным способом, в котором газ напускался с помощью пьезоклапана. Уменьшение напряжения пробоя позволяло снизить расход магнитного потока, создаваемого полоидальной магнитной системой токамака. Ток в разряде, инициированный плазменной струей, начинал свой рост примерно на

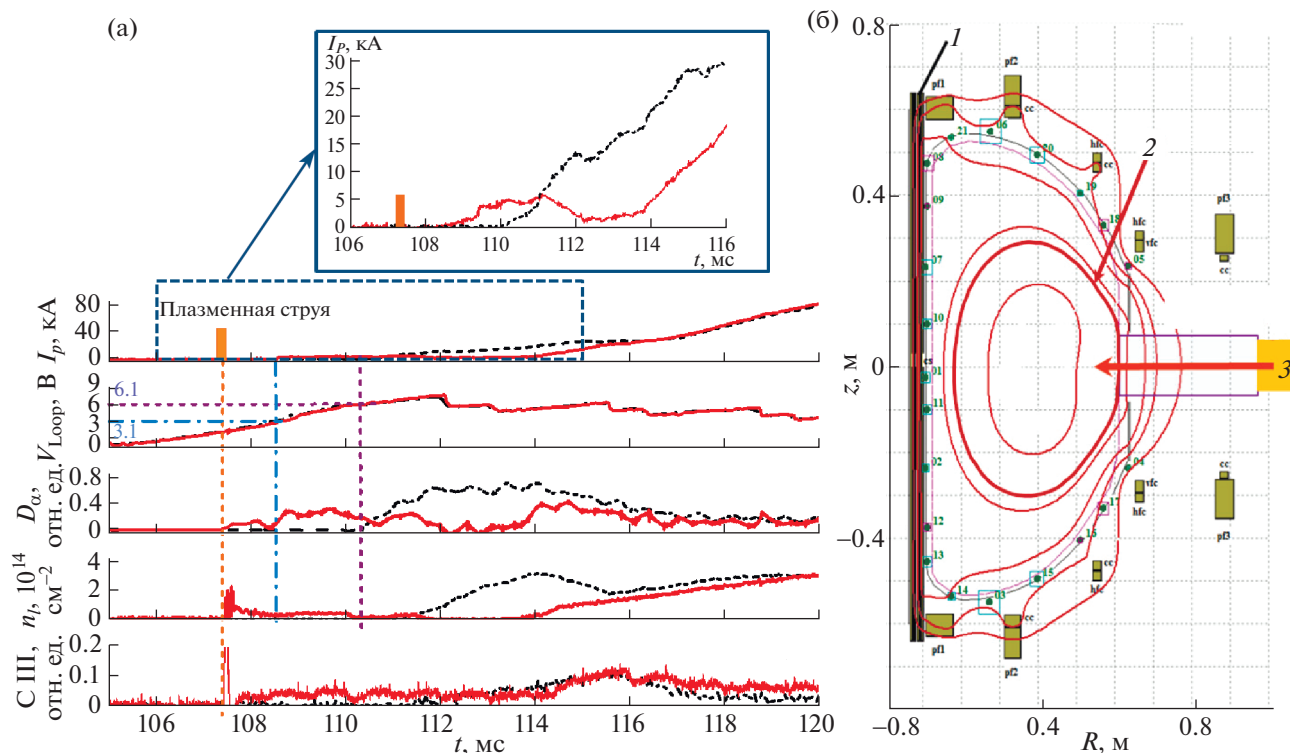


Рис. 7. а) Зависимости от времени t параметров плазменного разряда в токамаке Глобус-М2 в случае чисто индукционного пробоя рабочего газа (# 38956 — прерывистые кривые) и с инъекцией плазменной струи (# 38967 — сплошные линии): I_p — ток плазмы, V_{Loop} — напряжение на обходе плазменного шнура, интенсивности излучения линий D_{α} , СШ, усредненная по хорде плотность плазмы n_t ; б) реконструкция магнитных поверхностей на начальной фазе разряда в токамаке (119.6 мс разряда # 38967): 1 — центральная колонна, 2 — сепаратриса, 3 — плазменная струя.

2 мс раньше, но скорость его нарастания была ниже, чем в случае чисто индукционного пробоя. Это могло быть связано с особенностями работы системы управления током плазмы, настройки которой не были оптимизированы. После 116 мс токи выравнялись, а дальнейшее их увеличение происходило по одному и тому же сценарию. На 112 мс наблюдалось уменьшение плотности плазмы и уровня D_{α} вслед за током, после восстановления роста тока плазмы к 114 мс наблюдался рост плотности. Выход тока на плато происходил на 140–145 мс. Интенсивность свечения линии углерода в разряде с плазменной струей оказывалась примерно в 2 раза выше по сравнению с обычным разрядом. Снижение напряжения на электродах ускорителя до 4 кВ приводило к увеличению напряжения пробоя до 4.8 В, а ток в разряде, инициированный плазменной струей, начинал свой рост на 1 мс раньше, чем в случае чисто индукционного пробоя. При этом интенсивность свечения линии углерода оказывалась примерно на том же уровне, что и в разряде без инъекции плазменной струи.

На начальной стадии разряда с применением инъекции плазменной струи также, как и в слу-

чае чисто индукционного пробоя, происходило формирование конфигурации с замкнутыми магнитными поверхностями. На рис. 7б представлен вид крайней замкнутой магнитной поверхности, сформировавшейся к 119.6 мс, после инъекции струи (на 107.4 мс). Реконструкция была выполнена с помощью метода подвижных токовых колец [10].

На рис. 8 представлены видеокadres эволюции свечения разряда после инъекции струи плазмы в токамак. Струю инжестировали на 107.4 мс в течение 20 мкс. Видно, что до 111 мс развитие разряда происходило вдоль стенки вакуумной камеры. На 112 мс свечение разряда равномерно распределялось по объему камеры. Начиная со 114 мс, и в течение последующих 7 мс наблюдалось свечение вблизи патрубка, через который ранее инжестировалась струя. Можно предположить, что это результат взаимодействия вытекающего потока остаточного газа с плазменным шнуром, уже сформировавшимся к этому моменту. После 124 мс и до окончания разряда свечение наблюдалось только на периферии плазменного шнура.

Результаты исследований, полученные на токамаке Глобус-М2, позволили применить уско-

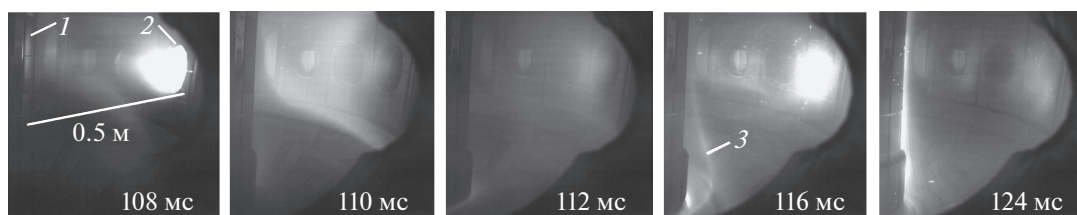


Рис. 8. Видеокадры свечения разряда # 38967, инициированного с помощью плазменной струи, на стадии пробоя и подъема тока. Время интегрирования 125 мкс. 1 – центральная колонна, 2 – патрубок, 3 – сепаратриса.

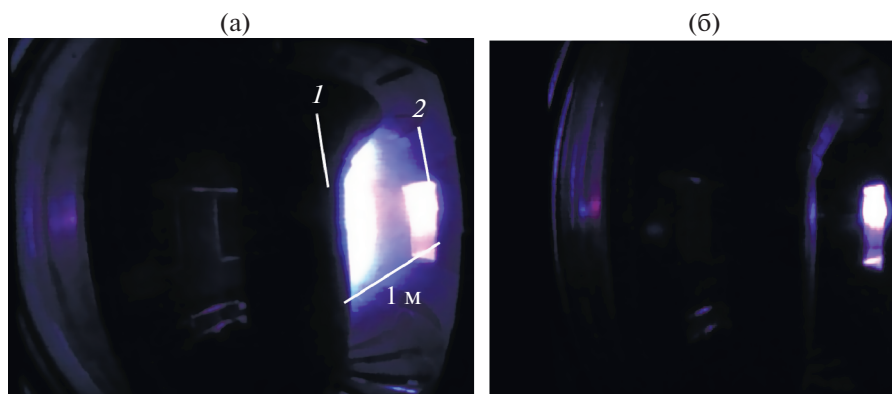


Рис. 9. Видеокадры плазменной струи, инжектированной через экваториальный патрубок в вакуумную камеру КТМ: без магнитного поля (а), с тороидальным магнитным полем 0.9 Тл (б). Время экспозиции ~4 мс. 1 – центральная колонна, 2 – патрубок, к которому пристыкован плазменный ускоритель.

ритель плазменной струи для организации пробоя и ионизации газа, а также оптимизации сценария начальной фазы разряда в Казахском материаловедческом токамаке.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА НА ТОКАМАКЕ КТМ

На токамаке КТМ была проведена серия экспериментов по получению пробоя в рабочем газе с использованием ускорителя плазменной струи, пристыкованного к экваториальному патрубку разрядной камеры. Следует отметить, что на момент проведения экспериментов уровень давления остаточных газов в вакуумной камере КТМ был повышен и составлял около 10^{-6} Торр. В связи с этим обстоятельством получение плазменного разряда с высокими параметрами по длительности и току плазмы было затруднено.

На рис. 9 представлены видеокадры инжекции плазменной струи в объем вакуумной камеры токамака КТМ. В случае инжекции без магнитного поля (см. рис. 9а) видно яркое свечение на выходе из патрубка и вблизи центральной колонны. Последнее, вероятно, связано с взаимодействием плазменной струи с графитовой стенкой. Однако при наличии тороидального магнитного поля

0.9 Тл свечение у центральной колонны практически отсутствовало (см. рис. 9б). В эксперименте без магнитного поля не наблюдалось четкой границы струи, зарегистрированной в эксперименте с инжекцией в токамак Глобус-М2. Такое отличие можно объяснить разными ракурсами видеосъемки и расстояниями от ускорителя до внутренней стенки вакуумной камеры. На токамаке Глобус-М2 расстояние от фланца экваториального патрубка до центральной колонны было чуть более 0.8 м, а на КТМ только длина экваториального патрубка составляла около 1 м. Углы видеосъемки на КТМ и Глобус-М и составляли ~108 и 45 градусов соответственно. Поэтому, скорее всего, на КТМ и не было видно четкой струи на выходе из патрубка.

На рис. 10 представлены временные зависимости параметров разряда, инициируемого с помощью плазменной струи совместно с вихревым электрическим полем индуктора. Для сравнения показаны аналогичные зависимости параметров разряда, произведенного лишь с помощью индукционного пробоя рабочего газа. Давление рабочего газа в камере составляло $\sim 4 \times 10^{-5}$ Торр. Видно, что чисто индукционный пробой происходил на 6 мс позже, с меньшей длительностью и амплитудой тока плазмы по сравнению с разря-

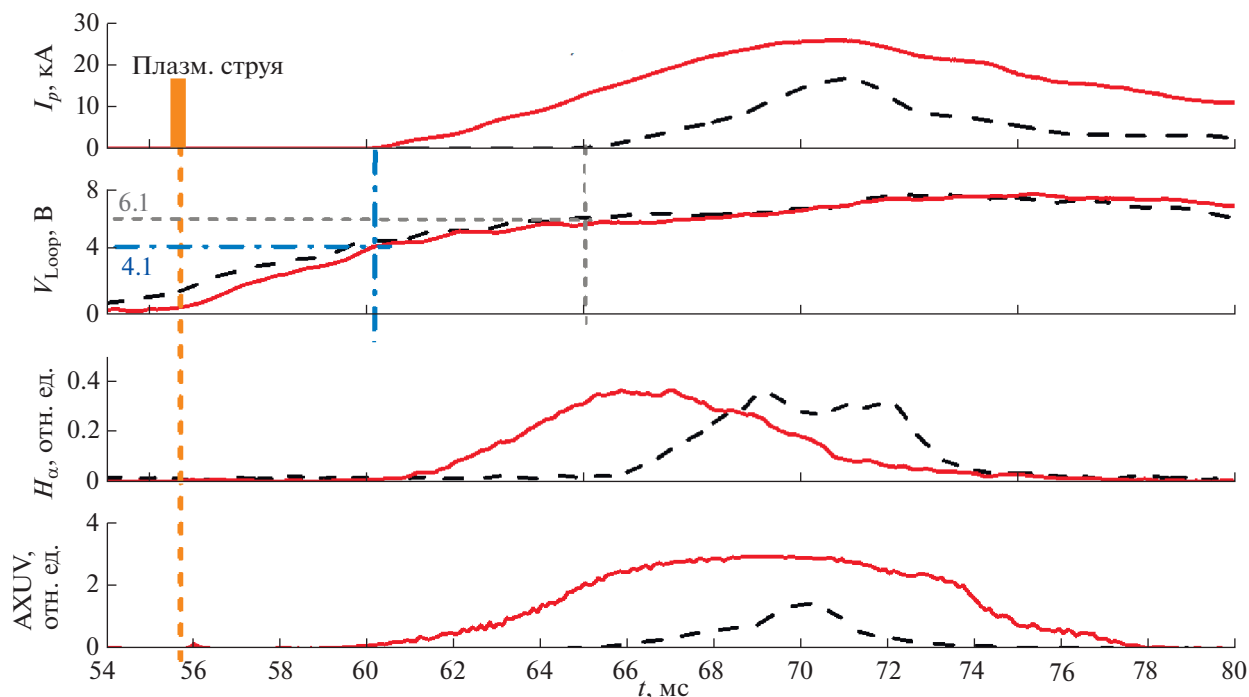


Рис. 10. Эволюция параметров плазменного разряда в токамаке КТМ, создаваемых с помощью инъекции плазменной струи совместно с полем индуктора – сплошные линии, #3884 и индукционного пробоя рабочего газа – штриховые линии, #3866.

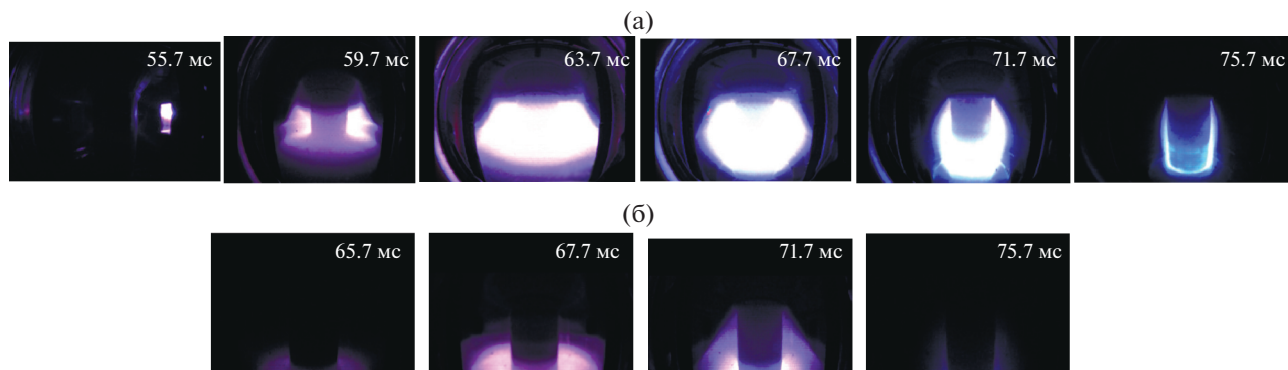


Рис. 11. Видеокadres разрядов в токамаке КТМ, создаваемых с помощью инъекции плазменной струи совместно с полем индуктора, # 3884 (а); индукционного пробоя рабочего газа, # 3866 (б).

дом с использованием плазменного ускорителя. Также пробой с инъекцией плазменной струи происходил при значении напряжения на обходе около 4 В, в то время как чисто индукционный пробой – при напряжении 6 В. Интенсивность свечения H_{α} и сигнал с обзорного болометра коррелировали во времени с током плазмы на стадии его роста. Различие величин радиационных потерь объясняется различной амплитудой тока плазмы. Как показали эксперименты, при использовании плазменного ускорителя практически во всех случаях достигался пробой. Без ис-

пользования ускорителя в некоторых случаях пробой отсутствовал совсем.

На рис. 11 для сравнения приведены видеокadres двух плазменных разрядов #3884 и #3866, соответственно с инъекцией плазменной струи (рис. 11а) и с чисто индукционным пробоем рабочего газа (рис. 11б). Как можно увидеть, при использовании коаксиального ускорителя иницирование плазменного разряда начиналось раньше на 5–6 мс. В обоих случаях плазменный шнур появлялся на внутреннем обходе вакуумной камеры в ожидаемом месте пробоя. В разряде с использо-

ванием ускорителя свечение разряда распределялось по большому объему вакуумной камеры по сравнению со свечением разряда, создаваемого чисто индукционным пробоем газа.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования возможности применения коаксиального ускорителя плазменной струи для инициирования пробоя и оптимизации начальной стадии разряда в токамаках Глобус-М2 и КТМ.

Эксперименты на токамаке Глобус-М2 показали, что при инжекции плазменной струи через экваториальный патрубок развитие разряда началось со стороны наружной стенки вакуумной камеры. При этом пробой происходил при значительно меньшем напряжении на обходе по сравнению со случаем чисто индукционного пробоя. После пробоя и по мере развития разрядного тока в центре камеры формировалась конфигурация с замкнутыми магнитными поверхностями.

Эксперименты на токамаке КТМ также показали, что при инжекции плазменной струи через экваториальный патрубок пробой происходил при значительно меньшем напряжении на обходе по сравнению со случаем чисто индукционного пробоя. При использовании плазменного ускорителя пробой достигался всегда, в то время как при его отсутствии в некоторых случаях пробой отсутствовал совсем.

Проведенные на токамаках Глобус-М2 и КТМ исследования показали, что применение коаксиального ускорителя плазменной струи значительно облегчало пробой в камере токамака, снижая необходимое для его инициирования напряжение. Это позволило, в свою очередь, значительно снизить расход магнитного потока, создаваемого полоидальной магнитной системой токамака. При этом применение плазменного ускорителя практически не оказывало влияния на последующий подъем тока и параметры разряда.

В работе использованы экспериментальные данные, полученные в рамках государственного задания № 0040-2019-0023 на УНУ “Сфериче-

ский токамак Глобус-М”, входящей в состав ФЦКП “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях” ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Также работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № 0784-2020-0020. Экспериментальный образец коаксиального ускорителя плазменной струи был изготовлен и испытан в рамках соглашения с Минобрнауки РФ (идентификатор проекта RFMEFI58519X0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vipin K., Sathyanarayana K., Bora D.* // *Pramana J. Phys.* 2008. V. 70. P. 487.
2. *Ejiri A., Takase Y., Oosako T., Yamaguchi T., Adachi Y., Watanabe O., Nagashima Y., An B., Kobayashi H., Kurashina H., Hayashi H., Matsuzawa H., Yamada K., Tojo H., Masuda T., Sasaki M., Kumazawa R., Kasahara H., Shimpo F.* // *Nuclear Fusion.* 2009. V. 49. P. 065010.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/6/065010>
3. *Mueller D.* // *Phys. Plasmas.* 2013. V. 20. P. 058101.
<https://doi.org/10.1063/1.4804416>
4. *Gryaznevich M., Shevchenko V., Sykes A.* // *Nuclear Fusion.* 2006. V. 46. P. 573.
5. *Dyachenko V., Chernyshev F., Chugunov I., Gin D., Gusev V., Khitrov S., Kurskiev G., Larionov M., Patrov M., Petrov Yu., Rozhdestvenskii V., Sakharov N., Shcherbinin O., Shevelev A., Stepanov A., Tolstyakov S.* // 37th EPS Confer. Plasma Phys. 2010. P. 5.151.
6. *Voronin A., Abramova K., Gusev V., Kurskiev G., Ayushin B., Kochergin M., Levin R., Minaev V., Mukhin E., Patrov M., Petrov Yu., Sakharov N., Scherbakov I., Tolstyakov S.* // 33nd EPS Conf. Plasma Phys. 2006. P. 4.105.
7. *Raman R., Mueller D., Jardin S., Jarboe T., Nelson B., Bell M., Gerhardt S., Hooper E., Kaye S., Kessel C., Menard J., Ono M., Soukhanovskii V., and the NSTX Research Team* // *Nuclear Fusion.* 2013. V. 53. P. 073017.
8. *Voronin A., Gusev V., Petrov Yu., Sakharov N., Abramova K., Sklyarova E., Tolstyakov S.* // *Nuclear Fusion.* 2005. V. 45. P. 1039.
9. *Voronin A., Goryainov V., Gusev V.* // *Technical Phys.* 2020. V. 90. P. 987-93.
10. *Vasiliev V., Kostsov Yu., Lobanov K., Makarova L., Mineev A., Gusev V., Levin R., Petrov Yu., Sakharov N.* // *Nuclear Fusion.* 2006. V. 46. P. S625.