

УДК 621.039.634:669.884

СОВРЕМЕННЫЕ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕДЕНИЯ ЛИТИЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКОВ

А.В. Вертков¹, В.А. Вершков³, М.Ю. Жарков¹, А.В. Карпов³, И.Е. Люблинский^{1, 2}, С.В. Мирнов⁴

¹АО «Красная Звезда», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

⁴АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Россия

В связи с внедрением лития как материала внутрикамерных элементов, обращённых к плазме токамака, актуальной становится задача создания соответствующих инструментов диагностики. Для токамаков Т-10 и Т-11М были разработаны и изготовлены устройства, позволяющие изучать процессы переноса лития в пристеночном слое плазмы (Scrape Off Layer — SOL) токамака, динамику его осаждения при различных температурах собирающей поверхности в режиме реального времени с помощью кварцевого пьезоэлектрического датчика, адсорбцию и десорбцию плазмообразующих газов литием, влияние электрического поля на процесс сбора лития. Сканирование параметров плазмы обеспечивается зондами Ленгмюра. Данные устройства могут быть использованы для извлечения лития, осевшего на стенках вакуумной камеры токамака, без её разгерметизации. Для этих целей предусмотрены шлюзовая камера и бессильфонный вакуумный ввод на основе инновационной жидкометаллической муфты. Исследование процесса взаимодействия литиевых внутрикамерных элементов с плазмой токамака планируется осуществить с помощью методики инфракрасной термометрии. Отработка этой методики планируется на токамаке Т-11М с помощью специально разработанного устройства на основе инфракрасной камеры.

Ключевые слова: литий, диагностика, перенос, осаждение, сорбция/десорбция, ИК-термометрия.

MODERN DIAGNOSTICS FOR INVESTIGATION OF LITHIUM ELEMENT BEHAVIOR IN TOKAMAKS

A. V. Vertkov¹, V. A. Vershkov³, M. Yu. Zharkov¹, A. V. Karpov³, I. E. Lyublinski^{1, 2}, S. V. Mirnov⁴

¹SC «Red Star», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University «MePhI», Moscow, Russia

³NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

⁴SC «SRC RF TRINITY», Moscow, Russia

Development of diagnostic tools is an actual task since lithium introduction as plasma facing material to the tokamak is foreseen. A series of diagnostic devices have been developed and fabricated for tokamaks T-10 and T-11M allowing to investigate a processes of lithium transport in tokamak plasma Scrape Off Layer (SOL), real time dynamics of lithium deposition at various temperatures of a collecting surface by means of the microbalance technique, hydrogen isotopes sorption/desorption process on lithium surface, influence of an electric field on lithium trapping. Scanning of plasma parameters is provided with Langmuir's probes. Some kind of such devices can be used for lithium extraction from the inner walls of the tokamak vacuum chamber without its opening. For these purposes a lock chamber and bellow-free vacuum input allowing movement and rotation is provided. Study of tokamak plasma interaction with in-vessel lithium based elements is planned to be performed by means of infra-red thermometry. Working-off of this technique is expected on T-11M using a special device on the basis of the infra-red camera.

Key words: lithium, diagnostics, transport, deposition, sorption / desorption, IR thermometry.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-1-35-40

ВВЕДЕНИЕ

В ряде экспериментальных исследований было убедительно показано, что использование лития в качестве материала, обращённого к плазме токамака, и стелларатора приводит, с одной стороны, к существенному улучшению параметров плазменного разряда, с другой — к возможности создания долговечных внутрикамерных элементов [1—4]. Таким образом, могут быть решены как плазмозофизические, так и технологические проблемы разрабатываемого стационарного реактора термоядерного синтеза. Принимая во внимание высокую сорбционную активность лития по отношению к водороду и его изотопам, необходимо исключить его неконтролируемое накопление на стенках камеры реактора и, как следствие, ограничить накопление трития. Организация замкнутой циркуляции лития в камере с использованием литиевых эмиттеров и коллекторов [1, 5] на основе капиллярно-пористых систем позволяет в основном решить эту задачу, однако часть потока атомов лития может достигать стенки камеры и должна быть

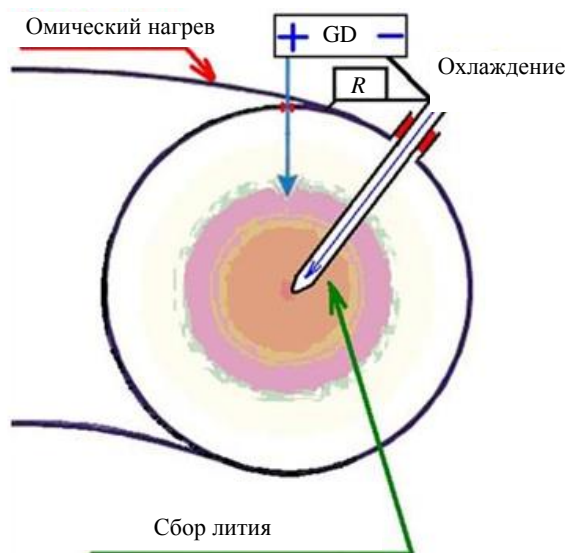


Рис. 1. Сбор лития с помощью криогенной мишени

удалена. Для решения этой задачи на токамаке Т-11М была разработана методика [6] эффективного сбора лития с внутренних поверхностей камеры с помощью криогенной мишени в условиях тлеющего разряда в инертном газе (гелий, аргон) и водороде (рис. 1).

Важным аспектом в изучении взаимодействия материалов на основе лития с плазмой токамака является разработка методики инфракрасной (ИК) термометрии, которая позволит исследовать динамику этого процесса и определить уровень входящих тепловых потоков. Проблема заключается в изменении такого важного для оптических измерений параметра, как излучательная способность литиевой поверхности в условиях реального токамака, которая может существенно меняться вследствие взаимодействия лития с остаточными газами в вакуумной камере с образованием продуктов реакции,

процесса переноса распыленного вещества, а также при изменении поверхности при непосредственном воздействии плазмы.

УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-11М

Разработанная конструкция криогенной диагностической мишени (рис. 2, а, б) включает приёмный элемент, который выполнен в виде полого гладкого цилиндра диаметром 58 и длиной 200 мм. Криогенная температура приёмной поверхности обеспечивается заливкой жидкого азота во внутреннюю полость через заливную трубу. Испарённый азот удаляется из полости непосредственно в атмосферу. В конструкции

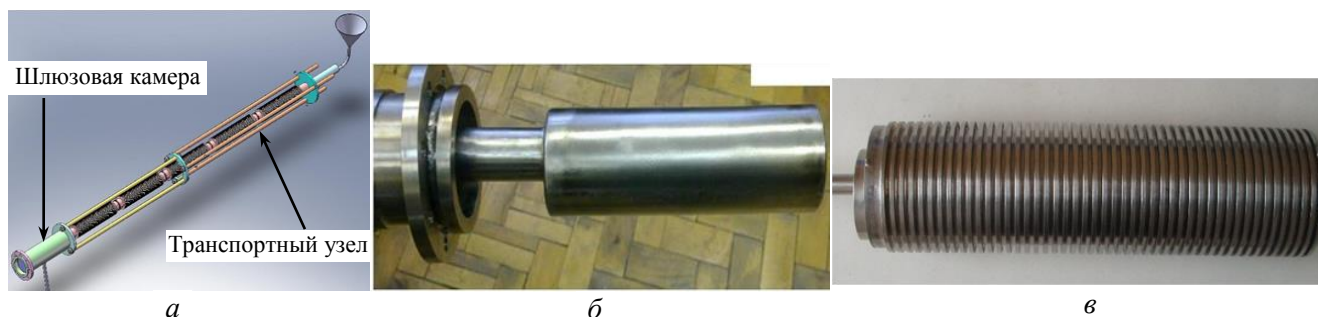


Рис. 2. Криогенная мишень токамака Т-11М: общий вид (а), приёмный элемент (б, в)

предусмотрена шлюзовая камера для извлечения и установки мишени без разгерметизации вакуумной камеры токамака. Транспортный узел выполнен на основе тарельчатого сильфона, обеспечивающего продольный ход мишени не менее 600 мм для установки её в рабочее положение. Криогенная мишень электрически изолирована от камеры, что расширяет экспериментальные возможности устройства, позволяя менять его электрический потенциал относительно плазмы. Температурный контроль приёмной поверхности мишени осуществляется встроенной во внутреннюю полость терпарой.

Дальнейшее развитие конструкции устройства заключалось в повышении эффективности захвата лития собирающим элементом за счёт увеличения приёмной поверхности путём оребрения (см. рис. 2, в) или установки капиллярно-пористой структуры.

Применение такой конструкции позволило изучить механизмы переноса лития в камере, оценить эффективность сбора лития и влияние на неё различных факторов (рис. 3). Было показано, что макси-

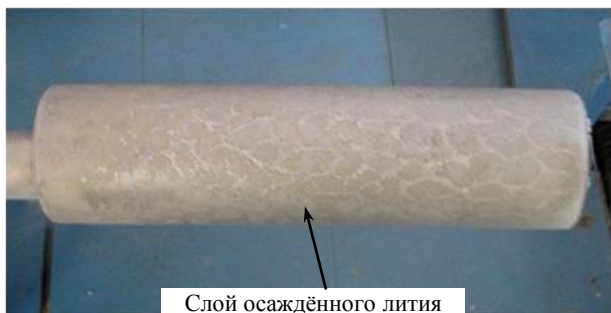


Рис. 3. Криогенная мишень после экспозиции в тлеющем разряде на водороде

мальная скорость сбора лития в заданных условиях токамака Т-11М достигает 3,5 мг/ч. Это обеспечивает извлечение за одну процедуру такого количества лития, которое накапливается на стенках камеры после 200 рабочих разрядов токамака Т-11М, что эквивалентно его двухнедельной работе. Кроме того, мишень использовалась для исследования переноса лития непосредственно в рабочем разряде токамака, будучи расположенной в тени литиевого лимитера.

Введение в конструкцию мишени нагревательного элемента, располагающегося в полости собирающего элемента (рис. 4), позволило исследовать зависимость процесса переноса лития, захвата и выделения водорода мишенью от температуры её поверхности в интервале -200 — $+400$ °С.

В последующей модификации устройства замена тарельчатого сальфона на вакуумный ввод на основе жидкометаллической муфты позволила обеспечить большие линейные перемещения (практически без ограничения), неограниченное вращение мишени вокруг собственной оси. Исключение сальфона позволило существенно повысить надёжность и ресурс вакуумного ввода, сделать конструкцию более компактной (продольный размер не больше 200 мм) и дешёвой. Модификация устройства сбора лития для токамака Т-11М на основе жидкометаллического вакуумного ввода показана на рис. 5, 6. Устройство включает внешнее сальниковое уплотнение типа Вильсона из фторкаучука и внутреннее уплотнение на основе капиллярно-пористого металлического сальника, пропитанного эвтектическим сплавом Ga—In с температурой плавления 16 °С. Пространство между уплотнениями откачивается до давления 300 Па. Вакуумный ввод работает при температуре выше 20 °С. Реализация такой конструкции вакуумного ввода на Т-11М в составе диагностического щупа с зондами Ленгмюра продемонстрировала её высокие эксплуатационные качества.

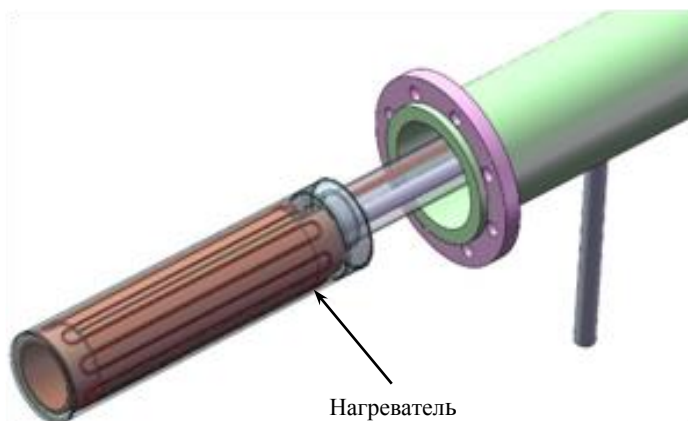


Рис. 4. Конструкция приёмной части литиевой мишени токамака Т-11М с возможностью нагрева

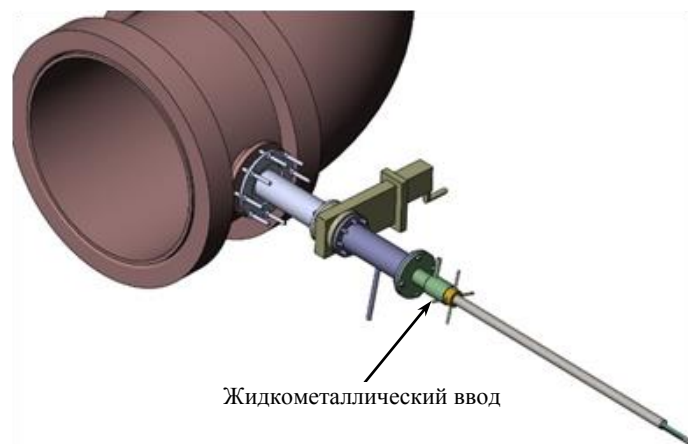


Рис. 5. Общий вид устройства сбора лития на токамаке Т-11М на основе жидкометаллического ввода



Рис. 6. Изготовленное устройство сбора лития токамака Т-11М с вакуумным вводом на основе жидкометаллической муфты

УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-10

Накопленный опыт конструирования и эксплуатации описанных устройств на токамаке Т-11М позволил начать разработку экспериментального устройства для исследования распределения потоков лития и его сбора в камере токамака Т-10, на котором в 2016 г. были начаты эксперименты с литиевой диафрагмой. Собирающая поверхность этого устройства выполнена в двух вариантах

(рис. 7): в виде гладкой цилиндрической поверхности (сбор и удаление) и в виде зонда, дающего возможность контролировать в реальном времени толщину слоя осевшего лития. Такая возможность обеспечивается встроенным в мишень кварцевым пьезоэлектрическим датчиком (метод QCM — quartz



Рис. 7. Устройство сбора лития для токамака Т-10: в форме гладкого цилиндра (а); в форме диагностического зонда (б, в)

crystal microbalance). Транспортный узел этого устройства, основанный на жидкометаллическом вводе и дополненный устройством углового смещения оси, позволяет сканировать распределение плотности потоков атомов и ионов лития и их направление. Изготовленное устройство для токамака Т-10 в двух вариантах исполнения головной части показано на рис. 8. Молибденовый экран и молибденовый защитный кожух обеспечивают защиту гладкой приёмной поверхности и пьезоэлектрического датчика от воздействия плазмы. На момент написания статьи уже проведены эксперименты с первым вариантом устройства (сбор и удаление лития), подтвердившие его эффективность. При температуре собирающей поверхности до 350 °С скорость сбора лития составила 2,1 мг/ч.



Рис. 8. Изготовленное устройство сбора лития для токамака Т-10: в форме гладкого цилиндра (а); в форме диагностического зонда (б)

ИК-ТЕРМОМЕТРИЯ ЛИТИЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Изучение взаимодействия материалов на основе лития с плазмой токамака нуждается в разработке методики ИК-термометрии, которая позволит исследовать динамику этого процесса и определить уровень приходящих тепловых потоков. Критическим моментом разработки ИК-диагностики, помимо правильного выбора технических параметров аппаратуры и сопряжённого с ней оборудования, является процесс калибровки. Известно, что достоверность измерения температуры с помощью ИК-камеры зависит от корректного учёта излучательной способности исследуемой поверхности ϵ . В случае исследования внутрикамерных элементов на основе капиллярно-пористой системы с жидким литием этот вопрос требует дополнительного рассмотрения. Полная излучательная способность чистой поверхности лития составляет 0,05 [7]. Исходя из того, что литий является чрезвычайно активным металлом по отношению к остаточным газам (O_2 , H_2 , CO_2 , N_2 , пары H_2O) в камере токамака, следует ожидать образования с течением времени различной толщины поверхностных плёнок продуктов реакции лития с этими газами. Образующийся на литии поверхностный слой является сложной смесью продуктов элементарных реакций, состав которой зависит от состава атмосферы в камере и содержания паров воды. Кроме того, он будет изменяться с течением времени. Исходя из этого, сложно определить и спрогнозировать изменение излучательной способности поверхности. Нельзя исключить и влияние на величину ϵ процесса переноса

продуктов эрозии с поверхности других внутрикамерных элементов камеры. При воздействии технологического и рабочего плазменных разрядов на поверхность литиевого лимитера можно ожидать изменения её свойств за счёт очистки от продуктов эрозии и химических реакций. В этой связи отработка методики ИК-диагностики литиевых внутрикамерных элементов (лимитеров) в условиях реального токамака, когда в полной мере возможно моделировать влияние атмосферы остаточных газов и воздействия плазмы на излучательную способность поверхности, имеет важнейшее значение.

Диагностика для токамака Т-11М реализуется с помощью устройства (рис. 9) на основе ИК-камеры со спектральным диапазоном 7—14 мкм, установленной на фланце диагностического порта и наблюдающей поверхность литиевого лимитера через окно из фторида бария.

Крепление ИК-камеры и наведение её на объект исследования обеспечиваются с помощью подвеса. Для исключения запыления окна в процессе технологических операций очистки внутренней поверхности вакуумной камеры и лимитера (тлеющий и индукционный разряд) предусмотрена подвижная шторка.

Насколько высокоинформативной является методика ИК-термометрии, можно судить по сравнительным данным наблюдения поверхности продольного литиевого лимитера токамака Т-11М, полученным с высокоскоростных камер оптического (а) и инфракрасного (б) диапазонов во время штатного плазменного разряда (рис. 10).

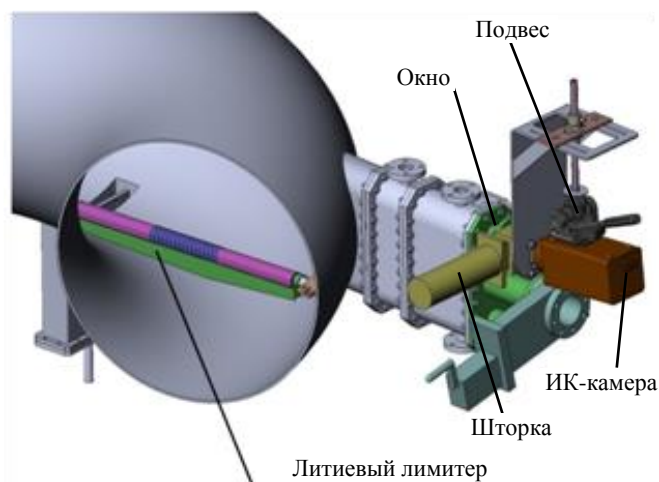


Рис. 9. Схема расположения ИК-диагностики

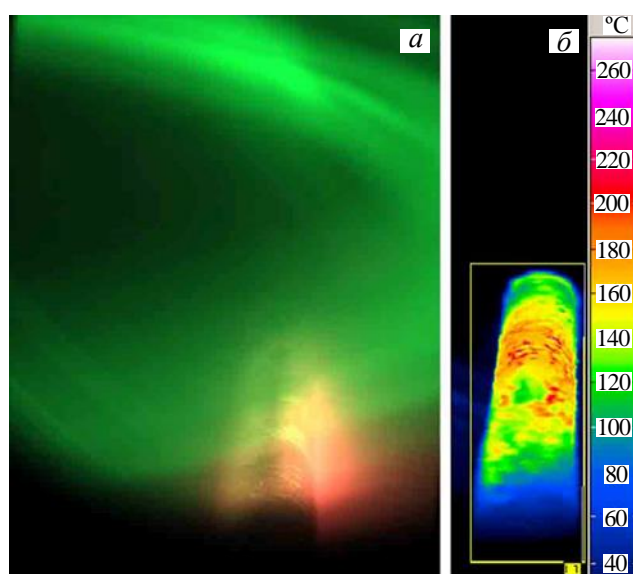


Рис. 10. Результаты наблюдения поверхности литиевого лимитера Т-11М, полученные с высокоскоростных камер оптического (а) и инфракрасного (б) диапазонов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

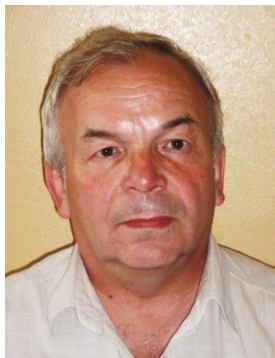
Для токамаков Т-10 и Т-11М был создан комплекс диагностических и технологических устройств, позволяющих изучать процессы переноса частиц лития в SOL токамака, динамику осаждения лития при различной температуре собирающей поверхности, адсорбцию и десорбцию плазмообразующих газов литием, влияние различных факторов на процесс сбора лития. Комплекс включает ИК-термометрию испытуемых внутрикамерных элементов. В экспериментальных кампаниях были доказаны работоспособность и эффективность этих устройств.

Публикация подготовлена по результатам исследований, выполненных с использованием оборудования УНУ «Комплекс установки ТСП». Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта RFMEFI59917X0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lyublinski I.E., Mirnov S.V. et al.** Development of lithium CPS based limiters for the realization of a concept of a closed lithium circulation loop in a tokamak. — *Physics Procedia*, 2015, vol. 71, p. 47—51.
2. **Mazzitelli G. et al.** Review of FTU results with the liquid lithium limiter. — *Fus. Eng. Des.*, 2010, vol. 85 (6), p. 896—901.
3. **Vertkov A., Lyublinski I., Mazzitelli G. et al.** — *Fus. Eng. Des.*, 2007, vol. 82, p. 1627—1633.

4. Tabarés F.L., Tafalla D., Oyarzabal E. et al. — IAEA-CPS-19/CD, EX/P5-36, IAEA, 2012.
5. Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T. et al. Recent lithium experiments in tokamak T-11-M. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. 224—228.
6. Вертков А.В., Жарков М.Ю., Люблинский И.Е. и др. Криогенная мишень для сбора лития в вакуумной камере токамака T-11M. — В сб.: Научные труды XVI конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, НИЯУ «МИФИ», 1—2 февраля 2013 г., с. 31—34.
7. **Handbook** of Thermodynamic and Transport Properties of Alkali Metals. Ed. R.W. Ohse. IUPAC. Chemical data N30. Blackwaell Scientific Publ. London—Oxford, 1985.



Алексей Викторович Вертков, заместитель начальника отдела, к. техн. н.; АО «Красная Звезда», 115230 Москва, Электролитный проезд 1А, Россия
avertkov@yandex.ru



Владимир Александрович Вершков, начальник лаборатории, д.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
v.vershkov@fc.iterru.ru



Михаил Юрьевич Жарков, ведущий инженер-конструктор, лауреат премии в области физики и технологии токамаков им. Э.А. Азизова 2017 г.; АО «Красная Звезда», 115230 Москва, Электролитный проезд 1А, Россия
MG-dist@yandex.ru



Алексей Владиславович Карпов, ведущий инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Игорь Евгеньевич Люблинский, начальник отдела, к. техн. н.; АО «Красная Звезда», 115230 Москва, Электролитный проезд 1А, Россия; доцент; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия
lyublinski@yandex.ru



Сергей Владимирович Мирнов, начальник отдела, профессор, д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат Государственной премии СССР и премии им. Л.А. Арцимовича РАН, член Международного комитета по координации физических исследований в поддержку проекта ИТЭР, эксперт МАГАТЭ по токамакам; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190 Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2017 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 35—40.