

УДК 621.039

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ В ИТЭР*К.Ю. Вуколов^{1,3}, Е.Н. Андреев^{1,2}, Р.С. Афанасенко^{1,2,4}, А.А. Борисов¹, А.А. Морозов^{1,2}*¹НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия²Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез — международные проекты», Москва, Россия³Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Кварцевое оптоволокно имеет высокое светопропускание в видимом диапазоне спектра и широко используется в современных термоядерных установках для передачи света из плазмы к детекторам. Как правило, для этой цели применяют волокно типа кварц—кварц—полимер с сердцевинной из чистого кварца и фторсодержащей наплавкой. В статье рассматриваются проблемы, которые могут возникать при эксплуатации волоконной оптики в составе диагностики плазмы в ИТЭР. Приведены результаты расчётов нейтронных потоков и их спектров в месте возможного размещения оптоволоконных коллекторов в ИТЭР. Сделаны оценки нейтронных флюенсов, которые будут набраны коллекторами за время их работы в ИТЭР. Для анализа проблем радиационной стойкости оптоволоконна привлечены результаты радиационных испытаний оптических волокон в ядерном реакторе и на 14 МэВ генераторе нейтронов. На основе анализа результатов радиационных испытаний и нейтронных расчётов сделан вывод о необходимости использования в ИТЭР кварцевого волокна с высокой радиационной стойкостью. Оптоволоконные коллекторы рекомендовано размещать за первой биозащитой в «ячейке порта» ИТЭР, где поток нейтронов из плазмы ослаблен до величины порядка 10^7 н/(с·см²). Сделано заключение о возможности применения современного оптоволоконна в составе оптических диагностик плазмы (в спектральном диапазоне 450—700 нм), при этом оптоволокно способно выдержать радиационные нагрузки, возникающие в процессе всего периода работы ИТЭР.

Ключевые слова: диагностика плазмы, оптоволокно, радиационная стойкость, ИТЭР.**FEATURES OF THE FIBER OPTICS APPLICATION IN ITER***K.Yu. Vukolov^{1,3}, E.N. Andreenko^{1,2}, R.S. Afanasenko^{1,2,4}, A.A. Borisov¹, A.A. Morozov^{1,2}*¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia²International Fusion Projects Coordinating Centre, Moscow, Russia³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia⁴National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

The silica-based optical fibers have high transmission in the visible range and they are widely used for transmitting light from plasma to detectors in the modern fusion devices. The pure silica-core/F-doped silica-clad fibers are the most used for plasma diagnostics. The possible problems of the fiber optics in ITER application are discussed in the paper. The estimates of the neutron spectra, fluxes and fluences throughout the ITER lifetime at the presumed fiber bundle location are given. A brief review is presented for the irradiation tests of the optical fibers in the fission reactors and at the 14 MeV neutron generator. The analysis of the irradiation tests and the neutron calculations shows necessity to use the modern silica fibers with high radiation resistance in ITER. The fiber bundles are recommended to be placed in the Port Cell behind the bioshield where the neutron flux from the plasma is attenuated to a value of $\sim 10^7$ n/(s·cm²). It is concluded that radiation resistance of the modern optical fibers provides the opportunity for their application (in the spectral range of 450—700 nm) during the whole ITER lifetime.

Key words: plasma diagnostics, optical fiber, radiation resistance, ITER.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-3-14-22

ВВЕДЕНИЕ

В составе оптических диагностик плазмы в современных термоядерных установках широко используются кварцевые оптоволоконные коллекторы. Кварцевое оптоволокно имеет высокое светопропускание в видимом диапазоне спектра и позволяет передать свет из плазмы на детекторы в диагностической пультовой с хорошим пространственным разрешением и малыми потерями [1, 2]. В большинстве случаев применяется оптоволокно типа кварц—кварц—полимер с сердцевинной из чистого кварца и фторсодержащей наплавкой диаметром от 0,1 до 0,6 мм и с численной апертурой 0,22. Вход оптоволоконного коллектора, как правило, размещается за вакуумным окном, на него объективом проецируется изображение исследуемого участка плазмы. Длина волокна в реальных экспери-

ментах составляет от 10 до 100 м. На рис. 1 в качестве примера показан спектр пропускания в видимой области кварцевого волокна длиной 100 м.

На токамаках TFTR и JET [2], где проводились тритиевые эксперименты, возникли проблемы с радиационными эффектами в оптоволокне, такими как наведённое оптическое поглощение (НОП) и радиационно-индуцированная люминесценция (РИЛ). Радиационные эффекты в оптоволокне обусловлены дефектами, которые возникают в кварцевом стекле под облучением [3—5]. Интенсивность этих процессов пропорциональна величинам потоков нейтронов и гамма-излучения в месте расположения волокна [3].

Согласно требованиям ИТЭР светопропускание волокна должно оставаться приемлемым для проведения измерений более 15 лет, вплоть до конца срока эксплуатации установки. Предполагается, что за это время длительность работы в D—T-режиме составит 4700 ч, или примерно $2 \cdot 10^7$ с. Из-за значительной длины оптоволокна в области радиационных полей (как минимум несколько метров) проблема падения его светопропускания в процессе эксплуатации может стать критичной [3, 6], поэтому необходимо использовать оптоволокно с высокой радиационной стойкостью. Очевидно, что для уменьшения радиационных нагрузок лучше всего размещать вход оптоволоконного коллектора как можно дальше от плазмы.

На ИТЭР оптоволоконные коллекторы можно разместить или сразу за вакуумным окном, в так называемом промежутке порта (Port Interspace), или дальше от плазмы — в ячейке порта (Port Cell) за биозащитой. Для примера на рис. 2 представлен вариант размещения диагностики — спектроскопия водородных линий (СВЛ) в экваториальном патрубке вакуумной камеры установки ИТЭР. Диагностика СВЛ предназначена для измерений интенсивности линий изотопов водорода и основных примесей в пристеночной плазме в спектральном диапазоне 450—700 нм. Как видно на рис. 2, при проектировании диагностики СВЛ выбран вариант с расположением оптоволоконного коллектора в ячейке порта. При этом возникает необходимость в использовании длиннофокусного ахроматического объектива, который для обеспечения необходимой радиационной стойкости приходится делать на основе оптических зеркал высокого качества.

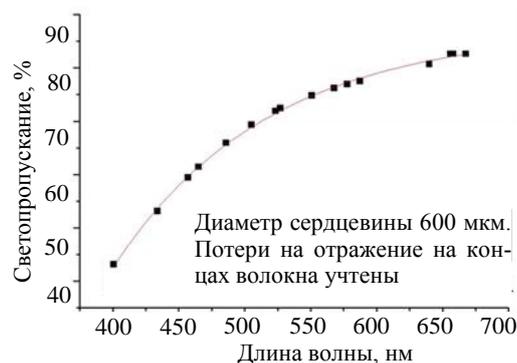


Рис. 1. Спектр пропускания кварцевого волокна длиной 100 м с высоким содержанием ОН и числовой апертурой 0,22 [P.D. Morgan, 2011, ITER IDM UID BUT55L]

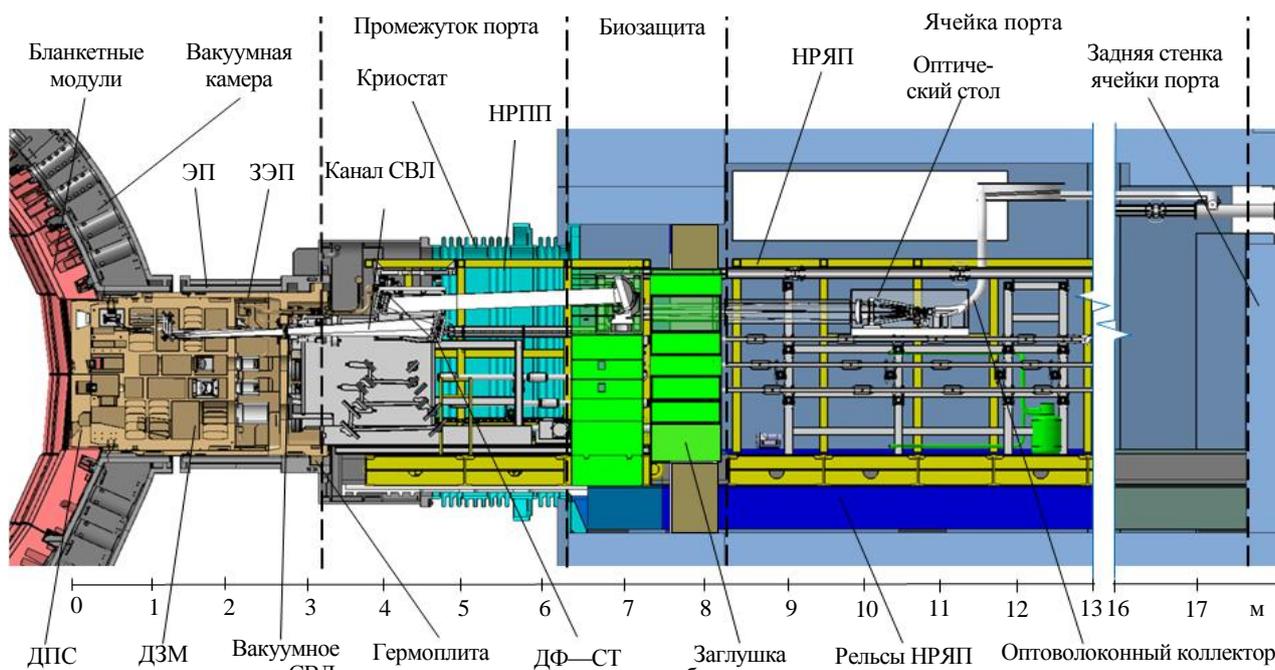


Рис. 2. Размещение СВЛ-диагностики на экваториальном уровне в секции 12 установки ИТЭР (вертикальное сечение): ДЗМ — диагностический защитный модуль; ДПС — диагностическая первая стенка; ЭП — экваториальный порт; ЗЭП — заглушка экваториального порта; НРПП — несущая рама в промежутке порта; НРЯП — несущая рама в ячейке порта; ДФ—СТ — длиннофокусный спектральный телескоп

РАДИАЦИОННЫЕ ПОЛЯ В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В ИТЭР

Для прогнозирования радиационных эффектов в оптических волокнах необходимо знать радиационные поля в местах их расположения на установке ИТЭР. Расчёты нейтронных и гамма-потоков выполнены методом Монте-Карло с использованием ядерных констант FENDL 2.1 [7]. В расчётах использован объёмный источник 14 МэВ нейтронов с максимумом плотности в центре вакуумной камеры ИТЭР, профиль источника в пологоидальном сечении задан концентрическими нитями. Результаты расчётов нормированы на 500 МВт термоядерной мощности реактора. При проведении расчётов транспорта нейтронов в качестве граничных условий было выбрано зеркальное отражение от внешних границ модели (т.е. прохождение первичных нейтронов за пределы расчётной модели исключено, в том числе через диверторные и верхние порты, а также через другие экваториальные порты).

Расчёт выполнен для экваториального патрубка 11 (EPP 11), конструкция которого наиболее проработана к настоящему времени. Модель EPP 11 для нейтронно-физического расчёта была включена в 40° C-Lite V25 ITER модель, специально предназначенную для проведения нейтронного анализа диагностических систем ИТЭР. В центральном диагностическом защитном модуле (ДЗМ) этого патрубка расположены две диагностические системы, разрабатываемые в России: анализатор нейтральных атомов (NPA) и два канала диагностики СВЛ (рис. 3).

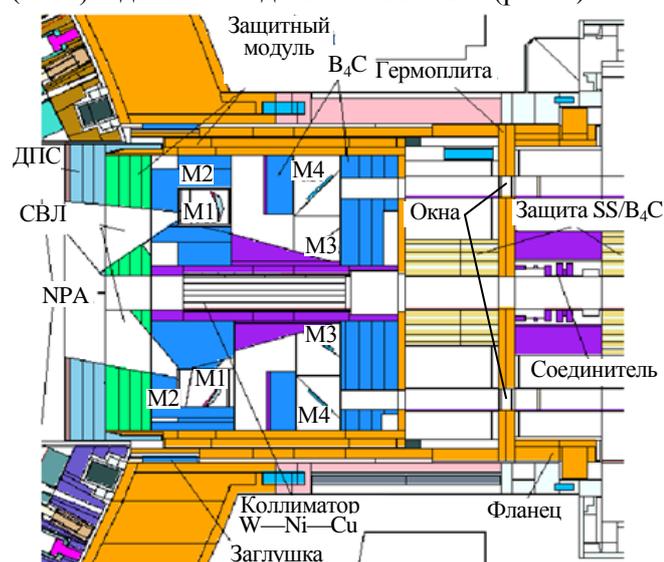


Рис. 3. Вертикальное сечение модели EPP 11 для нейтронно-физического расчёта

Основной задачей NPA-диагностики является измерение изотопного состава водородных ионов в плазме ИТЭР [8]. Поток атомов перезарядки из плазмы для NPA-диагностики собирается через прямой горизонтальный канал переменного сечения, соединяющий камеру реактора с детекторами, установленными в портовой ячейке за биологической защитой. Канал NPA в зоне ДПС имеет квадратное сечение со стороной 10,8 см. В глубине порта на оси канала расположен вольфрамовый коллиматор, предназначенный для ослабления потока нейтронов, который закрепляется в модуле с помощью стального блока. Коллиматор состоит из корпуса с толщиной стенки 1 см и рассеивающих пластин. Вдоль каждой стенки корпуса коллиматора проложены трубы водяного охлаждения диаметром 1 см.

СВЛ-диагностика в EPP 11 имеет два оптических канала для наблюдения верхней и нижней частей

внутренней стенки камеры ИТЭР. Каждый из каналов включает в себя узел входного зеркала (УВЗ), в котором расположены первое и второе зеркало (M1 и M2). Сферическое зеркало M1 направляет излучение на плоское зеркало M2, смещённое в горизонтальной плоскости, и из него поток света поступает на плоские зеркала M3 и M4. Зеркала M3 и M4 образуют перископическую систему, предназначенную для ослабления потока нейтронов на вакуумное окно из плавленного кварца, на которое они направляют свет. Зеркала M3 и M4 выполнены из алюминия методом алмазного точения. Сферическое зеркало M1 сделано из молибдена и имеет габариты 164×60×43 мм. Плоское зеркало M2 (164×50×27 мм) также состоит из молибдена.

По результатам нейтронно-физического расчёта полный по энергии поток нейтронов в переднем слое ДПС толщиной 2 см (представленного в расчёте смесью с объёмным соотношением воды и стали 10/90) составляет $1,2 \cdot 10^{14}$ н/(см²·с), удельное тепловыделение от нейтронов и захватных гамма-квантов — примерно 4,3 Вт/см³. В таблице приведены значения потока нейтронов и тепловыделения в оптических элементах вакуумной части диагностики СВЛ для D—T-режима ИТЭР.

Значения полного по энергии потока нейтронов и удельного тепловыделения во внутрикамерных зеркалах в результате воздействия нейтронов и гамма-квантов

Элемент	Верхний оптический канал		Элемент	Нижний оптический канал	
	Поток нейтронов, н/(см ² ·с)	Тепловыделение, мВт/см ³		Поток нейтронов, н/(см ² ·с)	Тепловыделение, мВт/см ³
M1	$1,0 \cdot 10^{12}$	45	M1	$5,8 \cdot 10^{11}$	25
M2	$1,5 \cdot 10^{12}$	64	M2	$8,1 \cdot 10^{11}$	35
M3	$1,3 \cdot 10^{11}$	0,86	M3	$7,2 \cdot 10^{10}$	0,3
M4	$5,7 \cdot 10^{10}$	0,41	M4	$3,7 \cdot 10^{10}$	0,1

В герметизирующей плите полный поток нейтронов составляет $8 \cdot 10^8$ н/(см²·с), в теле фланца $3 \cdot 10^8$ н/(см²·с). Спектры нейтронов в этих частях конструкции представлены на рис. 4. Следует отметить, что для участка спектра, характеризующего быстрые нейтроны ($E > 0,1$ МэВ), доля 14 МэВ нейтронов составляет около 10%. Тепловыделение в элементах, находящихся за герметизирующей плитой (см. рис. 3) вне криостата, не превышает 0,1 мВт/см³.

В кварцевом окне верхнего оптического тракта СВЛ полные потоки нейтронов и гамма-квантов равны $3 \cdot 10^8$ н/(см²·с) и $2,0 \cdot 10^8$ γ/(см²·с), а в окне нижнего оптического тракта — $8 \cdot 10^8$ н/(см²·с) и $6 \cdot 10^8$ γ/(см²·с) соответственно. За время работы ИТЭР в D—T-режиме поглощённая доза в окнах верхнего и нижнего трактов составляет примерно 0,03 и 0,13 МГр.

Для оценки нейтронных потоков в промежутке порта и вблизи фланца, за герметизирующей плитой справа и слева от защитного экрана NPA трубы в расчётную модель были включены два специальных детектора. Полный поток нейтронов в левом детекторе составил $1 \cdot 10^8$ н/(см²·с), в правом $8 \cdot 10^7$ н/(см²·с). На границе биологической защиты и ячейки порта он составляет $6 \cdot 10^7$ н/(см²·с). На рис. 5 показано расчётное распределение нейтронного потока в вертикальном сечении модели EPP 11.

Расчёты показывают, что при размещении входа оптоволоконного коллектора вблизи вакуумного окна в промежуточной зоне порта полный флюенс нейтронов (за $2 \cdot 10^7$ с работы ИТЭР в D—T-режиме) на первых 3—4 м длины волокна может быть снижен с $2 \cdot 10^{16}$ н/см² на входе коллектора до $4 \cdot 10^{15}$ н/см² у передней стенки биозащиты. Отметим, что в промежуточной зоне порта расположена начальная часть коллектора, далее он протянут по ячейке порта вплоть до задней бетонной стенки на расстояние еще около 10 м. При этом общая длина оптоволоконного поля радиационного излучения составит не менее 15 м.

Данные по нейтронным потокам и спектрам в ячейке порта представлены в работе [9] для секции 12 нижнего (диверторного) уровня. На рис. 6 показана карта нейтронных полей в ячейке порта вдоль продольной оси установки ИТЭР (плазма расположена справа). Видно, что поток нейтронов возрастает от примерно $6 \cdot 10^5$ н/(см²·с) у задней стенки ячейки порта до $2 \cdot 10^7$ н/(см²·с) около передней стенки (сразу за биозащитой). Это означает, что волокно, проложенное внутри ячейки порта, за полное время работы ИТЭР $2 \cdot 10^7$ с может набрать дополнительный флюенс нейтронов от $1 \cdot 10^{13}$ до $4 \cdot 10^{14}$ н/см². Отметим, что доля ней-

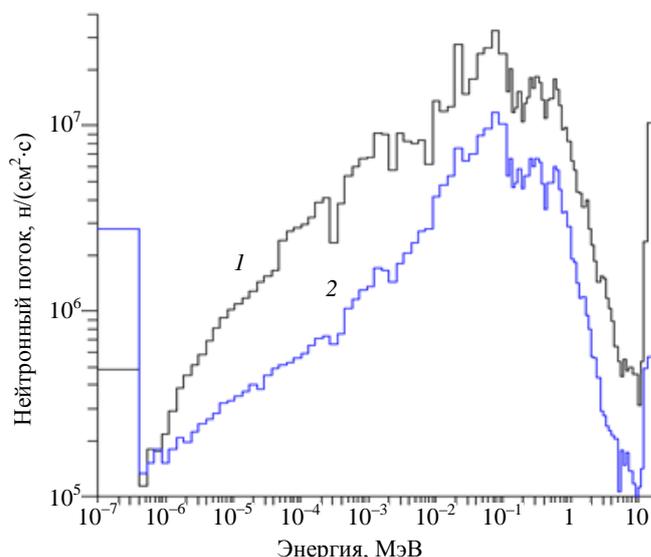


Рис. 4. Спектры нейтронов в гермоплите (1) и теле фланца (2)

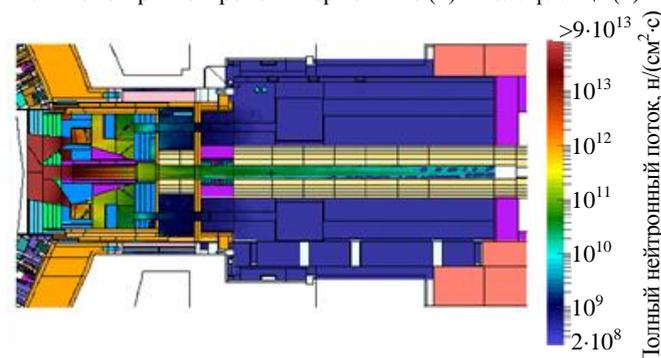


Рис. 5. Распределение полного потока нейтронов в вертикальном сечении экваториального порта 11, включая промежуток

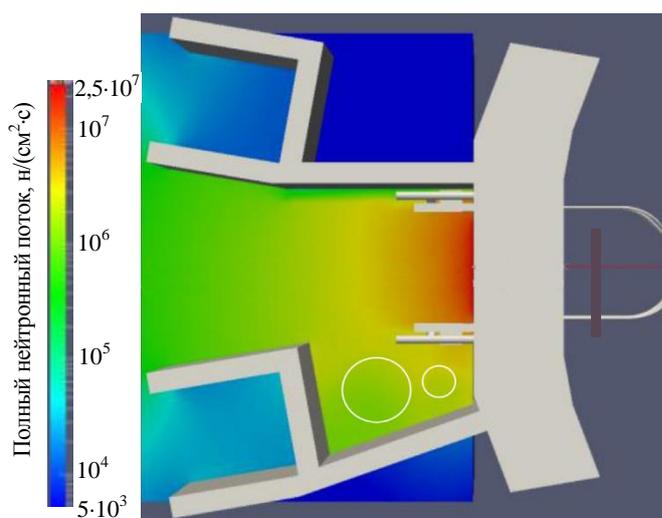


Рис. 6. Карта нейтронных полей (н/(см²·с)) в тороидальном сечении ячейки порта на нижнем (диверторном) уровне секции 12 (плазма справа) [9]

тронов энергией 14 МэВ в ячейке порта мала и составляет не более 1%. Уровень гамма-излучения в ячейке порта довольно низкий. Поглощённая доза гамма-излучения из горячей плазмы за время работы ИТЭР в D—T-режиме согласно [9] составляет 2 кГр (по кремнию).

ОБЗОР РАДИАЦИОННЫХ ТЕСТОВ ПО ОБЛУЧЕНИЮ ОПТОВОЛОКНА

Как было показано, ожидаемый флюенс нейтронов, приходящийся на оптоволоконную оптику, входящую в состав оптических диагностик ИТЭР, лежит в диапазоне от 10^{13} до 10^{16} н/см². Это сравнительно низкая радиационная нагрузка, нижний уровень которой в активной зоне ядерного реактора на мощности несколько МВт достигается за несколько секунд. По этой причине радиационных тестов оптоволокон в этом диапазоне нейтронных нагрузок немного. Это связано ещё и с тем, что задачей исследований, как правило, является поиск оптоволокон, которое можно будет использовать под интенсивным радиационным облучением. В большинстве экспериментов результаты получены для флюенса нейтронов выше 10^{17} н/см². Тем не менее удалось найти несколько работ, посвящённых экспериментам по облучению кварцевых волокон в ядерном реакторе и на 14 МэВ генераторе нейтронов до флюенсов, характерных для ИТЭР.

Результаты облучения в ядерном реакторе BR2 (Бельгия) легированного водородом кварцевого волокна с алюминиевым покрытием описаны в [10]. Эксперименты проводились на номинальной мощности реактора 56 МВт при мощности гамма-дозы 317 Гр/с и потоке быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) $2 \cdot 10^{12}$ н/(см²·с). Во время облучения измерены спектры наведённого оптического поглощения (НОП) для четырёх образцов кварцевого волокна длиной 200 м: КС-4В + H₂, КУ-1 + H₂, STU + H₂, STU без H₂. Три стекла из высокочистого плавленного кварца были использованы для изготовления этих волокон: КС-4В и

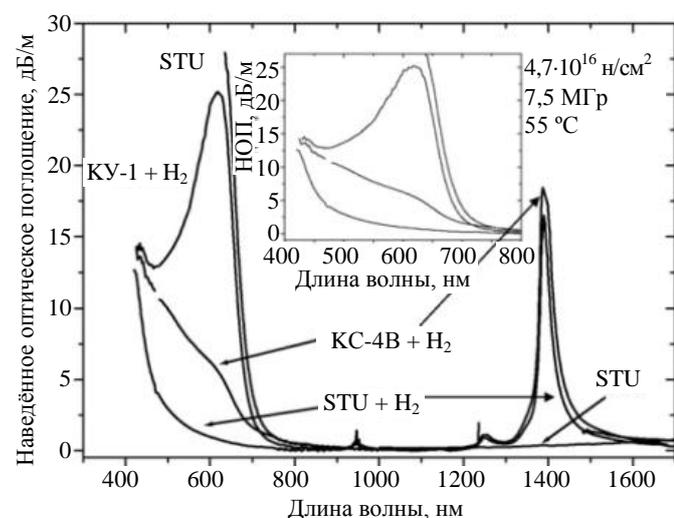


Рис. 7. Результаты облучения легированных водородом (H₂) кварцевых волокон. Вставка на рисунке показывает детали картины НОП в видимой области спектра [10]

STU с низким содержанием ОН и КУ-1 с высоким содержанием ОН. На рис. 7 представлены спектры НОП после облучения этих кварцевых волокон до полного флюенса нейтронов $4,7 \cdot 10^{16}$ н/см². Для волокна STU без водорода и КУ-1, легированного водородом, наблюдается сильное поглощение в узком диапазоне длин волн (с максимумом на длине волны 620 нм), что обусловлено наличием немостикового водорода. У оптоволокон КС-4В и STU, легированных водородом, этот эффект практически отсутствует. Очевидно, что легирование водородом волокон с низким ОН является очень эффективным для повышения их радиационной стойкости в видимой области. Но для устойчивости этого эффекта во времени необходимо использовать алюминиевое покрытие для консервирования водорода в волокне. Особенно важно то, что радиационная стойкость

всех легированных водородом волокон в видимом диапазоне после облучения до флюенса менее 10^{15} н/см² оказалась вполне приемлемой. Эффект НОП для них в области 450—700 нм не превышает 2 дБ/м. Следует подчеркнуть, однако, что насыщение оптоволокон водородом не меняет ситуацию в области спектра менее 450 нм, где пропускание очень быстро падает под облучением. На длинах волн короче 450 нм оптические измерения станут невозможными уже после нескольких импульсов ИТЭР в D—T-режиме.

Диаметр волокна составлял 0,25 мм, толщина алюминиевого покрытия 0,6 мм. Длина облучаемой части волокна, намотанного на катушку диаметром 100 мм, равнялась 10 м. Волокно было предварительно отожжено при 150 или 300 °С. Измерения пропускания оптоволокна были проведены непосредственно в процессе облучения. Источник света и спектрометр располагались в диагностической комнате на расстоянии 40 м от нейтронного источника.

На рис. 8 представлен эффект НОП в оптоволокне в результате его облучения до флюенса нейтронов $4,2 \cdot 10^{14}$ н/см². Показана картина изменения пропускания оптоволокна в спектральном диапазоне от 400 до 1000 нм для нескольких промежуточных флюенсов нейтронов. Облучение до максимального флюенса вызвало НОП около 5 дБ/м на длине волны 457 нм и около 1 дБ/м на длине волны 656 нм, но после флюенса $2,1 \cdot 10^{14}$ н/см² ситуация была лучше: 1,6 дБ/м на 457 нм и всего около 0,3 дБ/м на 656 нм.

Также важные результаты, полученные в процессе облучения волокна на генераторе 14 МэВ нейтронов, показаны на рис. 9.

Видно, что потери пропускания быстро растут под облучением 14 МэВ нейтронами и лишь незначительно снижаются сразу после прекращения облучения. Оптическое поглощение в отожжённом при 150 °С волокне значительно больше, чем в отожжённом при 300 °С.

Наконец, рассмотрим тесты по облучению легированных фтором кварцевых волокон в акриловой оболочке диаметром 0,125 мм [12]. Исследования были проведены на ядерном реакторе (при нейтронных флюенсах от 10^{15} до 10^{17} н/см² и сопутствующих гамма-дозах от 0,02 до 2 МГр) и на гамма-источнике (при дозах до 10 МГр). Измерения НОП в волокне были выполнены через несколько месяцев после облучения. Основные результаты этих исследований показаны на рис. 10.

После облучения образцов волокна до флюенса нейтронов 10^{15} н/см² НОП на длине волны 457 нм составляет 0,6 дБ/м, на длине волны 656 нм — 0,1 дБ/м, и это обнадеживающий результат. Для верхней границы интересующего нас диапазона флюенсов нейтронов 10^{16} н/см² результаты значительно хуже. На 457 нм поглощение в волокне составляет около 2 дБ/м, на 656 нм — примерно 1 дБ/м. Также видно, что нейтроны вносят бóльший вклад в деградацию пропускания оптоволокна по сравнению с воз-

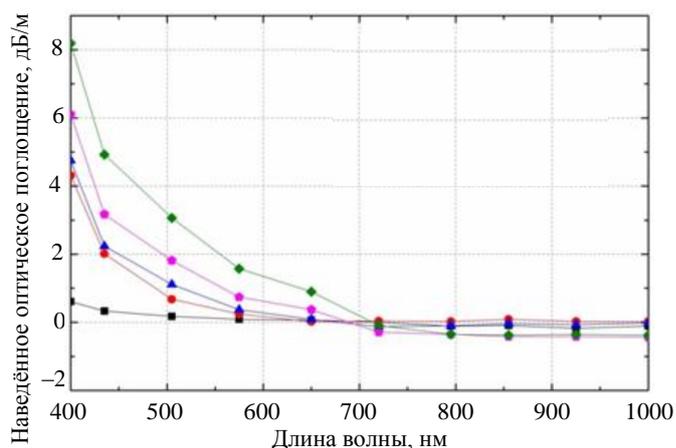


Рис. 8. Спектры НОП в результате облучения кварцевого волокна, предварительно отожжённого при 300 °С, в генераторе 14 МэВ нейтронов, до различных значений флюенса [11]: ■ — $7,5 \cdot 10^{12}$ н/см²; ● — $8,7 \cdot 10^{13}$ н/см²; ▲ — $2,1 \cdot 10^{14}$ н/см²; ◆ — $3,2 \cdot 10^{14}$ н/см²; ◆ — $4,2 \cdot 10^{14}$ н/см²

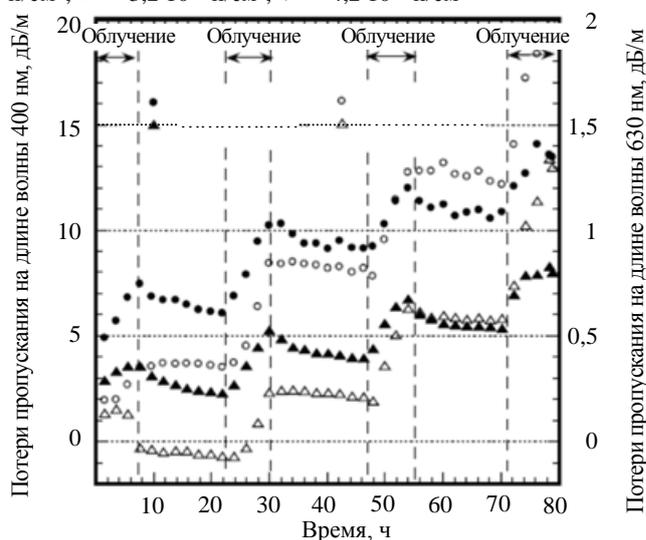


Рис. 9. Временная зависимость падения пропускания на 400 и 630 нм для оптических волокон, предварительно отожжённых при 150 и 300 °С [11]: ● — 400 нм, 150 °С; ▲ — 400 нм, 300 °С; ○ — 630 нм, 150 °С; △ — 630 нм, 300 °С

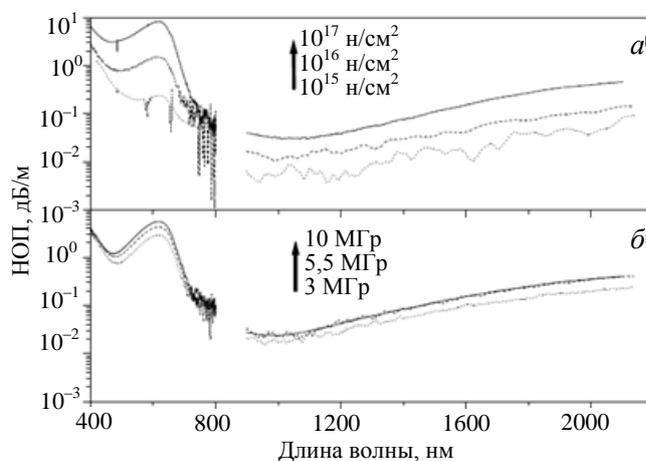


Рис. 10. Спектры НОП (100 дней после облучения) фтор-легированных оптических волокон, облучённых до трёх флюенсов нейтронов (а) и трёх доз гамма-излучения [12] (б)

действием сопутствующего гамма-излучения в ядерном реакторе.

ДИСКУССИЯ

Работы, посвящённые радиационным испытаниям оптоволоконных коллекторов, показывают заметный разброс в экспериментальных данных. Это вполне объяснимо, потому что результаты облучения кварцевого стекла зависят от многих факторов [5], которые варьируются от одного эксперимента к другому. Деградиация пропускания стекла зависит от спектра и плотности потока, мощности дозы, вида облучения, температуры стекла во время облучения и т.д. Следует также отметить, что на результаты радиационных испытаний оптоволокна влияет начальное количество примесей и дефектов в нём. В волокне это проявляется особенно сильно из-за его большой длины [13].

Результаты расчётов потоков нейтронов также различаются у разных авторов для одних и тех же зон установки ИТЭР. Причина этого кроется в различии геометрии и материалов нейтронной защиты в разных проектах диагностических систем ИТЭР. Ожидается, что на заключительном этапе проекта ИТЭР, когда будут устранены все конструкторские проблемы, результаты расчётов радиационных условий в ИТЭР будут соответствовать требованиям по ядерной безопасности. Это позволит сделать окончательные выводы о величине радиационных нагрузок на элементы диагностических систем. Однако уже сейчас нужно определиться с размещением и материалами для большинства этих компонентов, так как подходят сроки поставки оборудования на ИТЭР, хотя пуск установки ИТЭР и запланирован на конец 2025 г. Это касается и выбора материалов, и места размещения оптоволоконных коллекторов.

Выбор материала оптоволоконных коллекторов для ИТЭР невелик. Как показано в работе [10] по результатам облучения в реакторе деления, легированное водородом кварцевое волокно с низким содержанием ОН даёт минимальный эффект НОП. Тем не менее гарантировать необходимое для применения на ИТЭР долгосрочное, более 15 лет, сохранение водорода в таком волокне не представляется возможным, а значит, и применить его на практике нельзя. Наиболее подходящим является оптоволокно из плавленого кварца, легированного фтором [12]. Отметим, что для того чтобы убедиться в качестве исходного волокна, необходимо до изготовления оптических жгутов облучить образец, например, в гамма-источнике и проанализировать результат, сравнив его с результатами облучения радиационно-стойких образцов.

Как показано (см. рис. 10), для сохранения приемлемого пропускания волокна критическое значение флюенса нейтронов составляет примерно 10^{15} н/см². Это условие может быть обеспечено за биозащитой порта, где согласно нашим расчётам флюенс нейтронов за время работы ИТЭР в D—T-режиме не превышает $4 \cdot 10^{14}$ н/см² на участке волокна, проложенном внутри ячейки порта. При реализации такой схемы размещения аппаратуры возникает необходимость применения телескопической системы, которая будет передавать свет от вакуумного окна до входа в волоконный коллектор на расстояние несколько метров.

Более простой вариант расположения волоконно-оптических линий, а именно, вблизи вакуумного окна в промежутке порта, опасен с точки зрения эффекта НОП. Это обусловлено двумя факторами. Во-первых, флюенс нейтронов на начальном участке волокна от окна до биозащиты составит примерно 10^{16} н/см² по порядку величины за всё время работы установки в D—T-режиме, что может привести к возникновению потерь около 2 Дб/м в синей области спектра (см. рис. 10). А ведь это потери только на начальной части коллектора. Дополнительный флюенс нейтронов и соответствующие потери ожидаются также и на участке волокна в ячейке порта на длине не менее 10 м. Во-вторых, следует учесть наличие в зоне вблизи окна примерно 10% нейтронов энергией 14 МэВ (см. рис. 4), которые могут вызывать в стекле существенные дефекты, что хорошо заметно, если сравнить результаты экспериментов на генераторе 14 МэВ нейтронов (см. рис. 8) и в ядерном реакторе (см. рис. 10). В первом случае НОП намного больше, чем НОП после облучения в реакторе деления. При полном флюенсе нейтронов вблизи вакуумного окна $2 \cdot 10^{16}$ н/см² флюенс 14 МэВ нейтронов может составить более 10^{15} н/см². Это означает дополнительные и очень значительные потери в оптоволокне (см. рис. 8). Таким образом, размещение оптического волокна в промежутке порта может привести к неприемлемым потерям пропускания.

Для решения этой проблемы можно на начальном участке волокна предусмотреть локальную защиту от нейтронов достаточной толщины для того, чтобы обеспечить эффективное снижение потока нейтронов.

Опыт показывает, что толщина стенок такой защиты должна быть не менее десятков см. А значит, из-за больших габаритов могут возникнуть проблемы с её размещением.

Кроме того, выбирая место для размещения оптоволоконного коллектора, необходимо учитывать возможность дополнительного гамма-облучения в случае прохождения труб с водой для охлаждения бланкетов рядом с оптоволоконной трассой. Известно, что, пройдя по бланкету вблизи первой стенки, вода активируется нейтронами высокой энергии и в течение нескольких секунд является мощным источником гамма-излучения. По оценкам [9] поток гамма-излучения от распада азота-16 вблизи труб с активированной водой составляет $\sim 10^{11}$ $\gamma/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ [9], что обуславливает дополнительную дозовую нагрузку до 2 МГр (по кремнию). Такое воздействие может значительно снизить пропускание оптоволоконна, поэтому нужно или прокладывать его на достаточном расстоянии от труб водяного охлаждения, или использовать локальную защиту от гамма-излучения в этом месте.

Отметим ещё три важных факта. Во-первых, ожидаемая радиолюминесценция в материале оптоволоконна мала по сравнению с интенсивностью света из плазмы [3, 5]. Во-вторых, следует подчеркнуть, что термический отжиг не может рассматриваться как реальный способ восстановления оптической передачи волокна. По результатам экспериментов нагрев плавленого кварца до температуры менее 200 °С практически не улучшает его пропускание после нейтронного облучения, а для заметного термического отжига необходим разогрев кварцевого стекла более 400 °С [5, 13]. Такой температуры оптоволоконный коллектор не выдержит. В-третьих, предварительный отжиг волокна при 300 °С даёт увеличение радиационной стойкости согласно работе [8]. Этот факт может быть использован для подготовки волокна оптоволоконных коллекторов в ИТЭР.

Авторы выражают благодарность А.Г. Алексею и И.И. Орловскому за плодотворное обсуждение результатов и помощь в подготовке материала к публикации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчётного анализа полей излучения и радиационных испытаний в реакторах деления и на источниках нейтронов и гамма-излучения показали, что радиационно-стойкое оптоволоконно в составе диагностических систем ИТЭР способно выдержать радиационные нагрузки в течение всего периода работы при условии размещения волоконных коллекторов на достаточном удалении от плазмы, за биологической защитой. В этом случае можно гарантировать долгосрочное использование оптоволоконных коллекторов для диагностики D—T-плазмы в спектральном интервале 450—700 нм. При размещении волоконно-оптических линий вблизи вакуумного окна потребуются использование дополнительной нейтронной защиты.

REFERENCES

1. **Foord M.E., Marmar E.S., Terry J.L.** — Rev. Sci. Instrum., 1982, vol. 53, p. 1407.
2. **Maas A. et al.** Diagnostic experience during deuterium-tritium experiments in JET, techniques and measurements. — Fusion Eng. Des., 1999, vol. 47, pp. 247—265.
3. **Decreton M., Shikama T., Hodgson E.** Performance of functional materials and components in a fusion reactor: the issue of radiation effects in ceramics and glass materials for diagnostics. — J. Nucl. Mater., 2004, vol. 329—333, pp. 125—132.
4. **Griscom D.L.** Defect structures of glasses. — J. of Non-Crystalline Solids, 1985, vol. 73, pp. 51—77.
5. **Vukolov K.Yu.** Radiation effects in window materials for ITER diagnostics. — Fusion Eng. Des., 2009, vol. 84, pp. 1961—1963.
6. **Berghmans F., Brichard B., Fernandez A., Gusarov A., van Uffelen M., Girard S.** — In: An Introduction to Radiation Effects on Optical Components and Fiber Optic Sensors in Optical Waveguide Sensing and Imaging. — Springer, 2008, pp. 127—165.

7. **Lopez Al-dama D., Trkov A.** FENDL-2.1: Update of an Evaluated Nuclear Data Library for Fusion Applications. Report INDC(NDS)-46. — Vienna: IAEA, 2004.
8. **Afanas'ev V.I., Goncharov P.R., Mironov M.I., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Petrov S.Ya., Sergeev V.Yu.** Measurements peculiarities of isotopic composition of hydrogen ions in ITER plasma by using atoms flows diagnostics in conditions of neutral beams injection into the plasma. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2015, issue 41(12), p. 1062 (in Russian).
9. **Moro F. et al.** Characterization of the radiation field and evaluation of the nuclear responses in the ITER cryopump port cell. — *Fusion Eng. Des.*, 2016, vol. 109—111, pp. 461—467.
10. **Richard B., Tomashuk A.L., Oomsa H., Bogatyrvov V.A., Klyamkin S.N., Fernandez A.F., Berghmansa F., Decr'eton M.** Radiation assessment of hydrogen-loaded aluminium-coated pure silica core fibres for ITER plasma diagnostic applications. — *Fusion Eng. Des.*, 2007, vol. 82, pp. 2451—2455.
11. **Toh K. et. al.** Optical characteristics of aluminum coated fused silica core fibers under 14 MeV fusion neutron irradiation. — *J. Nucl. Mater.*, 2004, vol. 329—333, pp. 1495—1498.
12. **Morana A., Girard S., Cannas M., Marin E., Marcandella C., Paillet P., P'erisse J., Mac'e J.-R., Boscaino R., Nacir B., Boukenter A., Ouerdane Y.** Influence of neutron and gamma-ray irradiations on rad-hard optical fiber. — *Optical Materials Express*, 2015, vol. 5, № 4, DOI:10.1364/OME.5.000898.
13. **Ramsey A.T., Tighe W., Bartolick J., Morgan P.D.** Radiation effects on heated optical fibers. — *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, vol. 68 (1), pp. 632—635.

AUTHORS

Vukolov K.Yu. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; N.E.Bauman MSTU, 2-ya Baumanskaya str. 5, 105005 Moscow, Russia; Vukolov_KY@nrcki.ru

Andreev E.N. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Andreev_EN@nrcki.ru

Afanasenko R.S. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; Aphanasenko_RS@nrcki.ru

Borisov A.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Borisov_AA@nrcki.ru

Morozov A.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Morozov_AA@nrcki.ru

Received 31 May 2017
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol. 40, issue 3, pp. 14—22