

УДК 537.9

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ*Давыдов В.В. (Санкт-Петербургский политехнический ун-т Петра Великого, г. Санкт-Петербург),**Дмитриева Д.С. (Санкт-Петербургский государственный ун-т телекоммуникаций, г. Санкт-Петербург)*

e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Увеличение техногенного воздействия на окружающую среду, включая радиацию, привело к тому, что к дистанционным устройствам и датчикам контроля γ -излучения предъявляются все более жесткие требования [1—4]. Основное из них связано с повышением надежности их работы в автоматическом режиме. Появление персонала в зоне размещения датчиков планируется только в исключительных случаях или не предполагается по регламенту эксплуатации объекта.

В условиях неизвестности радиоактивного выброса датчики также должны измерять фоновое γ -излучение для контроля радиационной обстановки в реальном времени. Это означает, что датчик должен измерять мощность поглощенной дозы $\dot{D}$ в диапазоне 0,5 мкГр/ч—10 кГр/с. Кроме того, в режим измерения должна быть заложена функция его вывода из режима перегрузки (резкое повышение мощности поглощенной дозы). Этот режим должен включаться автоматически или дистанционно. Такие функции в находящихся в эксплуатации измерительных приборах и датчиках при большом диапазоне измерения мощности дозы $\dot{D}$ обеспечить крайне сложно. Один из вариантов решения этой задачи может быть связан с использованием волоконно-оптических датчиков или систем.

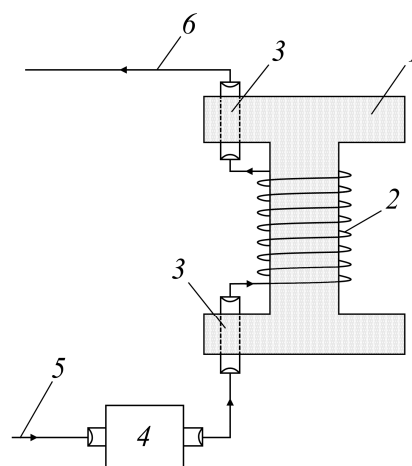
В настоящее время в мире разработано большое число волоконно-оптических датчиков и систем [1—4]. Часть из них нашла практическое применение на разных объектах для контроля дозы D или мощности поглощенной дозы $\dot{D}$, например, 0,004 Гр или 10^{-5} Гр/ч [5—7].

Для измерения мощности дозы более $2 \cdot 10^{-3}$ Гр/ч используют датчики и системы, в которых применяются волокна с легированием сердцевины хлором, фосфором, свинцом, а также редкоземельными металлами [8—10]. В последнее время часто в таких датчиках используется оптическое волокно с сердцевинной, легированной оксидом германия [10—13]. В таких

волокнах оболочка изготавливается из чистого кварца или легируется тем же элементом, что и сердцевина, концентрация легирующей примеси в сердцевине и оболочке должна различаться не менее чем в 2 раза. При мощности дозы более 0,2 Гр/ч волокно медленно темнеет, оптический сигнал затухает и измерения через несколько месяцев прекращаются.

Поэтому разработка новых моделей волоконно-оптических датчиков, которые позволят проводить продолжительные (более 20 лет) измерения γ -излучения в дистанционном режиме с погрешностью не более 5—6%, актуальна.

Волоконно-оптический датчик и методика измерений. С учетом созданных ранее конструкций [7, 10, 14—16] был разработан датчик с высокой чувствительностью к изменению мощности и оперативным восстановлением оптических свойств волокна (рис. 1). Датчик состоит из трех частей — оптическое волокно на катушке с коннекторами, соединительное волокно от источника лазерного излучения до датчика с изолятором и соединительное волокно,



Р и с. 1. Структурная схема волоконно-оптического датчика: 1 — катушка из полимера; 2 — оптическое одномодовое волокно с сердцевинной (легирование оксидом германия 5—20%); 3 — оптический коннектор, встроенный в корпус катушки, для соединения двух волокон; 4 — оптический изолятор; 5, 6 — ввод и вывод лазерного излучения соответственно

по которому лазерное излучение поступает в фотоприемный модуль. Соединительные волокна не задействованы непосредственно в измерениях γ -излучения, но при распространении лазерного излучения в них формируется затухание по мощности в оптическом сигнале, что необходимо учитывать при определении потери α_s . Поэтому необходимо использовать волокна с сердцевиной из чистого кварца, наиболее устойчивого к γ -излучению [13, 16—18]. Оболочка волокон легируется бором или фосфором. В этом случае затухание по мощности оптического сигнала, связанное с релеевским рассеянием, будет минимальным. Это позволяет при измерениях считать потери несущественными, особенно для мощности дозы, которая в 10 раз меньше, чем в зоне размещения катушки.

Небольшую мощность дозы в непрерывном режиме можно контролировать при обеспечении высокой чувствительности датчика к γ -излучению в зоне расположения катушки. Поэтому в отличие от ранее используемых датчиков или систем для измерений используется волокно длиной 1000—2000 м, сердцевина которого легирована оксидом германия. Проведенные ранее исследования [8, 10—13, 16—18] позволили установить, что с увеличением концентрации германия в сердцевине оптического волокна существенно возрастает скорость образования центров окраски при одной и той же мощности дозы. Данный отрезок волокна размещается на специальной катушке диаметром 1,02 м.

Для предложенной конструкции датчика разработана новая методика определения мощности поглощенной дозы с погрешностью менее 5—6%. Для этого была разработана система уравнений для описания $\alpha_s(\lambda)$:

$$\begin{aligned}\alpha_s(\lambda_1) &= K_1\alpha_g(\lambda_1) + K_2\alpha_q(\lambda_1) + K_3\alpha_c(\lambda_1) + K_4\alpha_i(\lambda_1); \\ \alpha_s(\lambda_2) &= K_1\alpha_g(\lambda_2) + K_2\alpha_q(\lambda_2) + K_3\alpha_c(\lambda_2) + K_4\alpha_i(\lambda_2); \\ &\quad (1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_s(\lambda_3) &= K_1\alpha_g(\lambda_3) + K_2\alpha_q(\lambda_3) + K_3\alpha_c(\lambda_3) + K_4\alpha_i(\lambda_3); \\ \alpha_s(\lambda_4) &= K_1\alpha_g(\lambda_4) + K_2\alpha_q(\lambda_4) + K_3\alpha_c(\lambda_4) + K_4\alpha_i(\lambda_4),\end{aligned}$$

где K_n — калибровочные коэффициенты, учитывающие влияние γ -излучения на оптические волокна и оптические элементы датчика; $\alpha_g(\lambda_n)$, $\alpha_q(\lambda_n)$, $\alpha_c(\lambda_n)$, $\alpha_i(\lambda_n)$ — оптические потери для волокон с сердцевиной, легированной оксидом германия и из чистого кварца, оптического кон-

нектора и оптического изолятора соответственно.

Для ее реализации необходимо определить $\alpha_s(\lambda)$ на четырех длинах волн и четыре значения K_n . Сопоставление исследования радиационно-наведенных потерь позволило установить, что коэффициенты K_n во всех четырех уравнениях системы (1) при формировании зависимости $\alpha_s(\lambda_n)$ будут одинаковые. Это объясняется тем, что процессы образования и релаксации центров окраски, особенно E' -центров, которые формируются в оптических волокнах под действием γ -излучения, не изменяются при лазерном излучении мощностью 10—15 мВт в диапазоне длины волн 1310—1660 нм [8—13, 16—18]. Коэффициенты K_n изменяются только при большой температуре в зоне расположения волокна. Эти случаи относятся к ядерным реакторам, специальным полигонам и др.

Особенностью практической реализации является необходимость обеспечить одинаковую входную мощность лазерного излучения на всех длинах волн, используемых для измерений. Кроме того, необходимо измерить потери α_c на коннекторе и α_g при разной концентрации оксида германия в сердцевине волокна на разной длине волны. Для контроля изменения γ -излучения необходимо заранее определить калибровочные (градуировочные) зависимости изменения коэффициентов $K_n(\lambda_n)$ для разной температуры. Для определения коэффициентов предлагаются следующие соотношения:

$$\begin{aligned}K_1(\lambda_n, \dot{D}) &= \alpha_{sg}(\lambda_n)/\alpha_r; \\ K_2(\lambda_n, \dot{D}) &= \alpha_{sq}(\lambda_n)/\alpha_r; \\ K_3(\lambda_n, \dot{D}) &= \alpha_{sc}(\lambda_n)/\alpha_r; \\ K_4(\lambda_n, \dot{D}) &= \alpha_{si}(\lambda_n)/\alpha_r,\end{aligned}$$

где λ_n — длина волны, на которой проводятся измерения; α_{sg} , α_{sq} , α_{sc} , α_{si} — потери волокон с сердцевиной, легированной оксидом германия, из чистого кварца, оптического коннектора, оптического изолятора соответственно; $\alpha_r = \alpha_s(\lambda_1) + \alpha_s(\lambda_2) + \alpha_s(\lambda_3) + \alpha_s(\lambda_4)$.

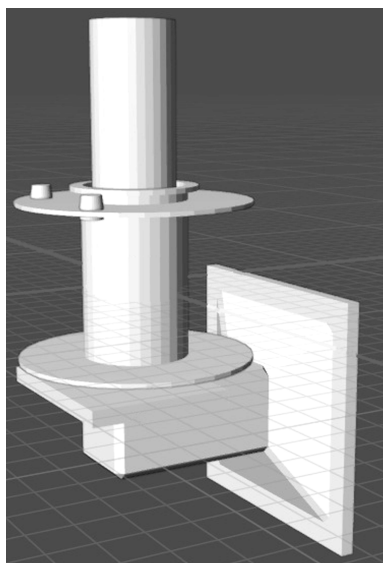
Разработанная модель позволяет проводить измерения на пяти и более длинах волны (во временной интервал между измерениями эта процедура укладывается), только повышается стоимость вспомогательной аппаратуры для реализации. Это показывает универсальность раз-

работанной системы и возможность ее адаптации к более сложным условиям эксплуатации.

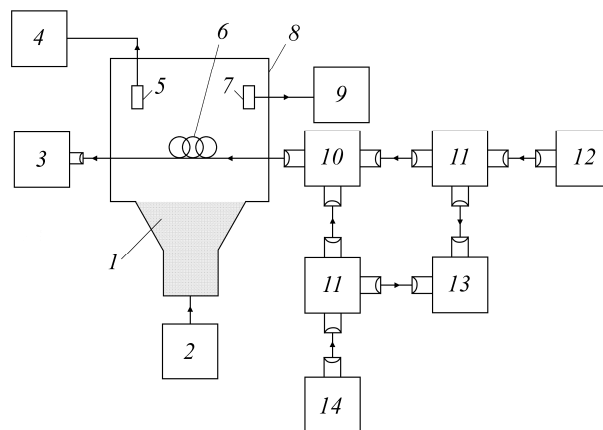
Перед установкой датчика на объекте для долговременных измерений дозы или мощности дозы необходимы дополнительные исследования физических процессов, связанных с формированием потерь. Кроме того, необходимо экспериментально отработать методику восстановления оптических свойств волокна, особенно в условиях постоянного воздействия γ -излучения. Пример установки датчика показан на рис. 2.

Экспериментальная установка для исследования волоконно-оптического датчика. Для исследований физических процессов, влияющих на потери, разработан стенд (рис. 3). Оптическое волокно в его конструкции облучается при двух вариантах эксплуатации. По волокну передается лазерное излучение в импульсном или постоянном режиме. Кроме того, датчик позволяет исследовать влияние переходных процессов в оптическом волокне на коэффициенты $K_n(\lambda_n, \dot{D})$ при его выключении и выключении источника γ -излучения. Отмеченные факторы вносят изменения в калибровочные зависимости, которые ранее не учитывались, что приводило к увеличению погрешности измерения.

Другой вариант исследований является классическим. Нет лазерного излучения в волокне. Он ранее реализовывался, и большинство данных основано на результатах этих исследований [4—13, 16]. Разработанный стенд позволяет исследовать потери, которые зависят от



Р и с. 2. 3D-модель размещения волоконно-оптического датчика



Р и с. 3. Структурная схема экспериментального стенда: 1, 2 — источник и блок управления источником γ -излучения соответственно; 3 — анализатор спектра; 4 — измеритель мощности ионизирующего облучения; 5 — счетчик Гейгера—Мюллера; 6 — волоконно-оптический датчик; 7 — термопара; 8 — замкнутая экранированная система из многослойного материала; 9 — измеритель температуры; 10 — мультиплексор; 11 — оптический делитель; 12 — перестраиваемый лазер с прямой модуляцией по току накачки; 13 — двухканальный измеритель оптической мощности; 14 — лазер для формирования дополнительного излучения

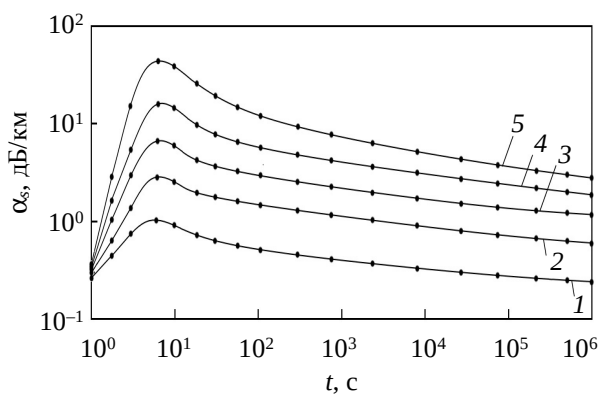
физических процессов образования центров окраски при одновременном воздействии γ -излучения на два волокна, находящихся в разных вариантах их эксплуатации.

В разработанном стенде для исследований использовались две модели перестраиваемого лазера (США) с возможностью регулирования мощности в диапазоне 0,01—60 мВт. Это позволило измерять потери в диапазоне изменения длины волны 380—760, 810—1100, 1200—1360, 1410—1680 нм. Дополнительно в стенде использовался ультрафиолетовый твердотельный лазер Wedge-HF-218 (Италия) с длиной волны 218 нм, мощностью 1—56 мВт. В некоторых случаях в исследованиях использовали классический ультрафиолетовый лазер с длиной волны 229 нм, мощностью 26 мВт. Исследование потерь в четырех диапазонах изменения длины волны связано еще с тем, что сигналы могут передаваться на ее разной длине. Аналоговые и цифровые сигналы передаются на длине волны 860—890, 980, 1310, 1550 нм, видеосигналы — в диапазоне 400—760 нм. Полученная новая информация может быть полезна при определении причин снижения мощности оптического сигнала в датчике при воздействии γ -излучения.

Ранее было установлено [5, 17, 18], что потери в оптических волокнах с различным типом

сердцевины существенно возрастают при увеличении поглощенной дозы 20 Гр и более. В зависимости от длины волны лазерного излучения характер изменения потерь при воздействии γ -излучения существенно различается. Это позволило определить для каждого типа оптического волокна длину волны лазерного излучения, при которой изменения $\alpha_s(D)$ будут максимальны. Однако, как показали измерения, этих данных недостаточно для выбора рабочей точки, которая обеспечит максимальную чувствительность датчика к γ -излучению при изменении мощности поглощенной дозы. Для этого были проведены исследования влияния γ -излучения на оптические волокна с разной степенью легирования ее сердцевины оксидом германия при кратковременном изменении мощности поглощенной дозы. На рис. 4 показано изменение потерь α_s во времени при мощности поглощенной дозы γ -облучения оптического волокна 14,5 Гр/с в течение 6 с. Потери измеряли на длине волны 1550 нм.

Исследования показывают, что с увеличением концентрации оксида германия в сердцевине волокна увеличивается скорость формирования центров окраски и их релаксации. Высокая крутизна фронта нарастания зависимости $\alpha_s(t)$ позволяет повысить чувствительность датчика к изменению мощности дозы облучения. Наличие небольшого периода возрастания $\alpha_s(t)$ после выключения источника γ -излучения связано с инерционными процессами, которые в калибровочных зависимостях не учитывались. Это приводило к большим ошибкам, особенно если калибровка реализовывалась с использованием мощного ионизирующего излучения (более 100 Гр/с).

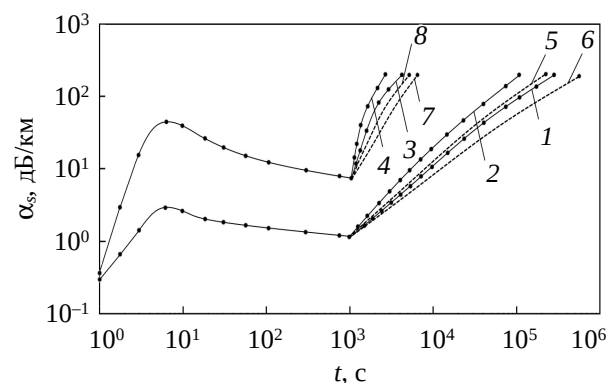


Р и с. 4. Изменение оптических потерь α_s от времени t при 294,2 К в одномодовом волокне с концентрацией оксида германия в сердцевине 0 (1), 1,5 (2), 4 (3), 10 (4), 20% (5)

Другим результатом исследований является то, что при мощности поглощенной дозы $\sim 0,01$ Гр/с и менее после выключения источника ионизирующего излучения потери не увеличиваются. Поэтому для исключения влияния фактора инерционности γ -излучения на зависимость $\alpha_s(D)$ калибровочные измерения необходимо проводить при мощности поглощенной дозы менее 0,01 Гр/с.

Анализ зависимостей релаксационных процессов в оптическом волокне показал нецелесообразность дальнейшего использования датчика для контроля дозы или мощности дозы, в котором заложена функция восстановления оптических свойств на основе естественной релаксации. Например, для волокна с концентрацией оксида германия в сердцевине 20% время восстановления оптических свойств для определения поглощенной дозы 30 кГр составляет более 10^{12} с. За это время может резко увеличиться мощность дозы, что приведет к недостоверным измерениям.

На рис. 5 показан результат исследования двух волокон с разной концентрацией легирования сердцевины оксидом германия при комбинированном воздействии γ -излучения. Сначала на волокно в течение 6 с воздействовали γ -излучением мощностью поглощенной дозы 14,5 Гр/с, затем воздействие прекращалось до времени 10^3 с. Далее мощность поглощенной дозы уменьшали до 0,2 Гр/с. В другом случае в момент времени 10^3 с на волокно воздействовали γ -излучением с мощностью поглощенной дозы 0,5 Гр/с. Потери измеряли на длине волны 1550 нм.



Р и с. 5. Измеренные и расчетные оптические потери α_s от времени t при 294,4 К в одномодовом волокне с концентрацией оксида германия в сердцевине 1,5% после воздействия γ -излучения в момент времени 10^3 с мощностью поглощенной дозы 0,2 (1, 5), 0,5 (2, 6), 0,2 (3, 7), 0,5 Гр/с (4, 8) соответственно

Анализ показывает, что оптические потери $\alpha_s(t)$ с момента времени 10^3 с возрастают с другой крутизной фронта в отличие от сформированных при первом облучении волокна (см. рис. 5, 1—4). Это показывает, что полученные ранее калибровочные зависимости для коэффициентов $K_n(\lambda_n)$ использовать нельзя. Остаточная поглощенная доза в момент времени 10^3 с неизвестна. Это подтверждается расчетами (см. рис. 5, 5—8) с использованием ранее найденных коэффициентов $K_n(\lambda_n)$.

Исследования показывают, что образование новых центров окраски больше их естественной релаксации. В момент времени 1127 с потери α_s достигли значения, которые были в момент времени 8 с. В момент времени 1127 с измерены потери $\alpha_s(\lambda_1)$, $\alpha_s(\lambda_2)$, $\alpha_s(\lambda_3)$, $\alpha_s(\lambda_4)$. Далее с использованием уравнения (1) определены коэффициенты $K_n(\lambda_n)$ и по полученным ранее калибровочным зависимостям рассчитана поглощенная доза. Затем после пересчета была определена мощность поглощенной дозы 0,06 Гр/с. Она отличается более чем в 3 раза от 0,2 Гр/с на стенде для облучения оптического волокна. При мощности поглощенной дозы на стенде 0,5 Гр/с измеренная мощность дозы с использованием датчика составила 0,13 Гр/с. Значительное отклонение результатов в сторону уменьшения в контрольных измерениях в условиях γ -излучения недопустимо.

Также наблюдается расхождение расчетных и экспериментальных данных. Это, с одной стороны, объясняется неопределенностью при учете релаксационных процессов в волокне при наличии фонового излучения, которые зависят от температуры, состава центров окраски. Выбор среднего значения по релаксационным процессам при моделировании привел к расхождению с экспериментами на 10%.

Проведенные далее эксперименты показали, что ошибка в определении мощности поглощенной дозы с увеличением времени эксплуатации оптического волокна под воздействием γ -излучения только возрастает. Это подтверждает необходимость восстановления прозрачности оптического волокна до состояния, при котором проводилась калибровка коэффициентов $K_n(\lambda_n)$ при первом воздействии на него γ -излучения. Это необходимо для достоверных измерений. Только полное восстановление оптических

свойств сердцевинны волокна с учетом небольшой деградации обеспечит измерение дозы или мощности поглощенной дозы с погрешностью 5—6%. Такая погрешность достаточна для оценки радиационной ситуации.

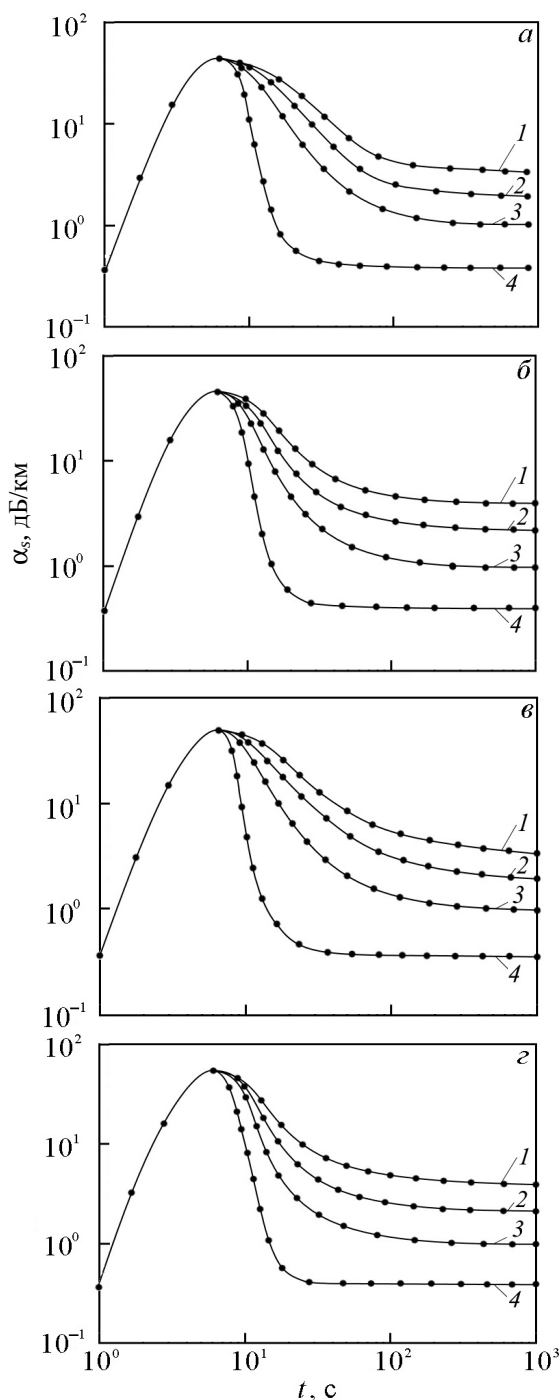
В настоящее время разработан метод очистки оптического волокна от центров окраски с использованием дополнительного лазерного излучения как в непрерывном, так и в импульсном режиме работы лазера [12, 14, 16—18]. Эти режимы реализуются на стенде даже при воздействии γ -излучения на волокно, что соответствует реальным условиям эксплуатации датчика.

Необходимо отметить, что выбор режима работы лазера для формирования дополнительного излучения определяется площадью сечения сердцевинны волокна и его профилем. При большой мощности дополнительного лазерного излучения можно разрушить структуру оптического волокна, особенно легированного оксидом германия с высокой концентрацией. Поэтому необходимы исследования, которые позволят установить оптимальные параметры лазерного излучения для очистки оптического волокна.

На рис. 6 показано изменение потерь α_s от времени при разных режимах воздействия γ -излучения на оптическое волокно и его очистке с использованием лазерного излучения мощностью 40 мВт при двух значениях температуры. В зонах реактора и других местах температура отличается в 2—3 раза.

Исследования изменения оптических потерь показали, что с уменьшением длины волны дополнительного лазерного излучения при одной и той же мощности скорость восстановления его оптических свойств увеличивается. Для длины волны 218 нм оптические свойства волокна за время 8—10 с полностью восстанавливаются при наличии фонового ионизирующего излучения или небольшом кратковременном выбросе.

Кроме того, процесс быстрого увеличения мощности поглощенной дозы также можно зарегистрировать с использованием разработанной конструкции датчика. После восстановления оптических свойств волокна разработанный датчик можно применять для дальнейших измерений, используя полученные калибровочные (градуировочные) зависимости при разной температуре.



Р и с. 6. Изменение оптических потерь α_s от времени t в одномодовом волокне с концентрацией оксида германия в сердцевине 20% с введенным в него дополнительным лазерным излучением на длине волны 1310 (1), 980 (2), 446,4 (3), 218 нм (4): а, б, в, г — мощность поглощенной дозы, Гр/с и температура, К в зоне размещения оптического волокна 0,2 и 294,4, 0,02 и 294,5, 0,2 и 331,6, 0,02 и 331,5 соответственно

Заключение. Результаты исследования показали надежную работу рассматриваемого датчика в непрерывном режиме измерения поглощенной дозы или мощности поглощенной дозы на длине волны 1550 нм с системой дополни-

тельной очистки оптического волокна от центров окраски на длине волны 218 нм. Наибольшее расстояние от места расположения измерительной аппаратуры до зоны контроля γ -излучения датчиком составляет 2000 м. При погрешности измерения мощности поглощенной дозы 10% расстояние можно увеличить до 3000 м, но измерения с такой погрешностью не всегда востребованы.

Исследования позволили разработать новый режим работы, в котором при определенной мощности дозы поглощения и мощности дополнительного лазерного излучения в волокне наблюдается равновесие между двумя процессами: образованием новых центров окраски и релаксацией центров, которые образовались ранее. Расчеты подтверждают наличие данного режима, потери α_s за определенный промежуток времени увеличиваются менее чем на 0,3%. В таком случае разработанный датчик для контроля радиационной обстановки будет находиться в режиме ожидания.

Необходимо также отметить, что увеличение расстояния будет связано с разработкой новых типов оптических волокон с меньшим коэффициентом релеевского рассеяния лазерного излучения на длине волны 218 нм для эффективной очистки от центров окраски.

Отдельным пунктом для датчика является подготовка к эксплуатации — поверка перед установкой. Это можно обеспечить с использованием Государственных первичных эталонов ГЭТ 8—2019 и ГЭТ 38—2024 [19, 20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климов Д.А., Гулевич А.В., Каграманян В.С. и др. Вызовы и стимулы развития натриевых быстрых реакторов в современных условиях. — Атомная энергия, 2018, т. 125, вып. 3, с. 131—135.
2. Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Калугин М.А. и др. К стратегии развития ядерной энергетики в России. — Там же, 2019, т. 126, вып. 4, с. 183—187.
3. Давыдов В.В., Мязин Н.С., Кирюхин А.В. Ядерномагнитные расходомеры-релаксометры для контроля расхода и состояния теплоносителя и питательной воды в АЭС. — Там же, т. 127, вып. 5, с. 250—255.
4. Lee K., Kim M., Lee J., Lee P. Recent advances in ocean nuclear power plants. — Energies, 2015, v. 8, p. 11470—11492.
5. Dmitrieva D.S., Pilipova V.M., Dudkin V.I. e.a. Fiberoptic sensor for monitoring radiation level. — Lecture Notes Comp. Sci., 2022, v. 13158, p. 230—239.

6. Rana S., Subbaraman H., Fleming A., Kandadai N. Numerical analysis of radiation effects on fiber optic sensors. — *Sensors*, 2021, v. 21, p. 4111—4122.
7. Rovera A., Tancu A., Boetti N. e.a. Fiber optic sensors for harsh and high radiation environments in aerospace applications. — *Ibid.*, 2023, v. 23, p. 2512—2323.
8. Girard S., Morana A., Ladaci A. e.a. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications. — *J. Optics*, 2018, v. 20(9), p. 093001.
9. Davydov R., Dudkin V., Logunov S., Bobyl A. Optical method for controlling the flow rate of the coolant in nuclear reactors. — In: *Proc. of the Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics*, 2021, p. 179—183.
10. Cieslikiewicz-Bouet M., El Hamzaoui H., Ouerdane Y. e.a. Investigation of the incorporation of cerium ions in MCVD-Silica glass preforms for remote optical fiber radiation dosimetry. — *Sensors*, 2021, v. 21, p. 3362—3376.
11. Girard S., Kuhnhehn J., Gusarov A. e.a. Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges. — *IEEE Transac. Nucl. Sci.*, 2013, v. 60(3), p. 2015—2036.
12. Toccafondo I., Alessi A., Blanc J. e.a. Irradiation of multimode Ge-doped and F-doped optical fibers at cryogenic temperatures down to 10 K. — *J. Lightwave Techn.*, 2023, v. 41, p. 286—292.
13. Girard S., Alessi A., Richard N. e.a. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers. — *Rev. Phys.*, 2019, v. 4, p. 100032.
14. Jiang R., Wang R., Guo J. e.a. Design and analysis of a two-dimensional large-scale silicon-photon optical phased array. — *Optics Laser Techn.*, 2022, v. 156, p. 108551.
15. Davydov V., Reznikov B., Dudkin V. New optical system for long distance control of electrical energy flows. — *Energies*, 2023, v. 16, p. 1040—1058.
16. Le Corre K., Barnini A., Robin T. e.a. Watt-level deep-UV subnanosecond laser system based on Nd-doped fiber at 229 nm. — *Optics Lett.*, 2023, v. 48, p. 1276—1279.
17. Davydov V.V., Davydov R.V., Kiryukhin A.V. e.a. Optical flowmeter for measuring the coolant flow rate in the primary loop of a nuclear reactor. — *Atomic Energy*, 2022, v. 132, № 5, p. 282—287.
18. Dmitrieva D.S., Pilipova V.M., Davydov V.V., Valiulin L.R. About compensation of radiation — induced losses in optical fibers. — *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, v. 1695, p. 012130—012136.
19. Оборин А.В., Виллеваальде А.Ю., Трофимчук С.Г. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучения ГЭТ 8—2019. — *Измерительная техника*, 2020, № 8, с. 12—18.
20. Берлянд А.В. Государственный первичный эталон единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц ГЭТ 38—2024. — Там же, 2024, № 9, с. 12—18.

Поступила в Редакцию 06.03.24

УДК 621.039.58

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ QUENCH-10, -16 ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ОКИСЛЕНИЯ ЦИРКОНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ В ПАРОВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

*Меркулов В.В., Федоров М.С., Васильев А.Д. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)
e-mail: fedorov_ms@nrcki.ru*

Одним из аспектов обоснования безопасности при проектировании АЭС является обеспечение водородной взрывозащиты при тяжелых запроектных авариях. Основным источником водорода при авариях с осушением и плавлением топлива является пароциркониевая реакция. Эксперименты 2000-х гг. показали, что при наличии воздуха характер ее протекания может изменяться. Такие данные были получены в том числе в рамках серии экспериментальных исследований QUENCH (Германия), которые были направлены на изучение процессов, происходящих при заливе водой осушенной разогретой активной зоны легководных реакторов [1]. Особое внимание уделялось влиянию параметров

экспериментов на скорость генерации и количество водорода, образующегося при окислении циркониевых оболочек ТВЭлов, в том числе на стадии залива активной зоны водой. Исследования проводились для условий окисления в паровой и паровоздушной среде (табл. 1).

В экспериментах QUENCH-03, -06 исследовалось окисление оболочек ТВЭлов в паровой среде в условиях, характерных для развития аварий в реакторной установке [2, 3]. Постановка экспериментов QUENCH-10, -16, -18 была приближена к условиям развития аварии в бассейне выдержки, при этом исследовалось влияние наличия воздуха на образование водорода [4].