

А.А. ЗОЛОЧЕВСКИЙ, д-р. техн. наук, *Г.В. ГОНЧАРОВА*, НТУ “ХПИ”,
Ю.А. БОРОДЕНКО, канд. техн. наук, *Ю.С. КОЗЬМИН*, Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, г. Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

У статті описані дослідження взаємозв'язку між характеристиками сцинтиляційних матеріалів, такими як структура, склад та дефекти мікроструктури, та властивостями матеріалів, пов'язаними з дифузійними процесами та деформуванням, а також дослідження впливу характеристик матеріалів, градієнтів температури, кисню та вологи, випромінювання та повзучості на деградацію та зниження терміну експлуатації сцинтиляційних детекторів. Також в роботі буде описано, як характеристики матеріалу, дифузійні процеси, температурні градієнти, випромінювання та повзучість, а також зростання пошкоджуваності внаслідок повзучості, що супроводжується мікроструктурними змінами в детекторах через деякий час, можуть бути керованими, використовуючи аналіз напруженого стану. Це дозволить знизити деградацію та оптимізувати конструкцію, а також підвищити час експлуатації сцинтиляційних детекторів.

In this paper, a comprehensive investigation will be carried out with the main focus directed at the understanding of the relationships between characteristics of scintillators such as structure, composition and microstructure defects, and material properties related to diffusion processes and deformation as well as at the understanding on how these material characteristics, gradients of temperature, oxygen and water, radiation and creep affect degradation and lifetime reduction of scintillators. Furthermore, focus is put on how the material characteristics, diffusion processes, thermal gradients, radiation and creep as well as the creep damage growth due to microstructural changes of scintillators over time may be controlled using induced stress analysis in order to reduce degradation and optimize design, and extend lifetime of scintillators.

Введение. Одним из основных методов, используемых при регистрации и спектрометрии ионизирующих излучений в различных областях физики высоких энергий, ядерной медицины, геофизики, в мониторинге биологических объектов и окружающей среды, является сцинтилляционный метод, основанный на возникновении вспышек света в люминофорах. Этот метод нашел широкое применение в элементах систем детектирования ионизирующих излучений [1-3].

Сцинтилляционный детектор представляет собой систему в виде сцинтиллятора, сочлененного с фоточувствительным элементом (фотодиодом или фотоэлектронным умножителем). Детектор окружен светоотражающей оболочкой и, как правило, герметизирован в корпусе. Таким образом, практически в детектор объединяются несколько разнородных оптических и конструкционных материалов. В зависимости от эксплуатационных требований, предъявляемых к детектору, при согласовании материалов возникают технические противоречия из-за различия физических свойств. Устранение этих противоречий приводит как к появлению новых решений в других областях науки и техники, так и к получению новых материалов.

Твердые сцинтилляторы, нашедшие применение в элементах систем детектирования ионизирующих излучений, представляют собой органические и

неорганические монокристаллы и поликристаллы, а также аморфные (пластмассовые) сцинтилляторы [1-3]. В зависимости от назначения сцинтилляторам придают форму пластин, стержней, цилиндров, пленок, гранул, нитей.

Неорганические сцинтилляторы обладают достаточным сечением полного поглощения гамма-фотонов и высокой прозрачностью в пределах полосы флуоресценции. Это позволяет использовать кристаллы большого объема, что обеспечивает высокую чувствительность детектирования и широкий энергетический диапазон применения [1].

Органические сцинтилляторы обладают высоким быстродействием и высокой прозрачностью к собственной флуоресценции, эффективно регистрируют нейтроны, успешно используются при идентификации ионизирующих излучений по форме импульса. Обладая малым эффективным атомным номером, они имеют преимущества перед неорганическими кристаллами при регистрации легких заряженных частиц, что особенно важно в задачах радиоэкологии.

Наряду с монокристаллами широкое распространение получили прессованные *поликристаллические органические сцинтилляторы* (полисицины), обладающие более высокой механической и термической стойкостью при таком же световом выходе. Повышенная прочность полисицинов связана с тем, что в поликристалле тепловое или механическое воздействие обычно ограничено малым объемом, а в монокристалле трещина легко распространяется по всему объему. Полисицинам легко придавать любую сложную форму и любые размеры.

Пластмассовые сцинтилляторы в качестве элементов сложных детекторных систем современных ускорителей в течение длительного времени (до 10 лет) должны работать при интенсивных радиационных нагрузках. Для удовлетворительной работы в подобных условиях они должны иметь не только высокую стойкость к воздействию ионизирующих излучений, но и высокую долговременную стабильность. Проблема радиационной стойкости пластмассовых сцинтилляторов является предметом многочисленных исследований, и за последние годы накоплен значительный объем экспериментальных данных. При этом совершенно недостаточное внимание уделяется долговременной стабильности параметров пластмассовых сцинтилляторов в процессе их хранения и эксплуатации [2].

Основными характеристиками сцинтилляторов являются световой выход (отношение числа фотонов, излученных сразу после поглощения ионизирующей частицы или γ -кванта, к поглощенной дозе), энергетическое разрешение, эффективный атомный номер, время высвечивания, максимум спектра излучения, уровень послесвечения, прозрачность к собственному излучению.

В ходе эксплуатации сцинтилляторов в результате влияния термических, механических и радиационных воздействий, а также влияния внешней среды, в системах неизбежно происходят различного рода изменения во времени. Таким образом, влияние дестабилизирующих факторов на сроки работоспособности сцинтилляторов, а также изменения во времени радиационной стойкости и стабильности, термостабильности, механической прочности, гигроскопичности

сцинтилляционных материалов являются не менее важными показателями, чем сцинтилляционные характеристики [3]. Так, например, в полимерной матрице протекают процессы, сопровождающиеся деградацией ее химической и физической структуры. Со временем на поверхности и в объеме образуются точечные дефекты, микропоры, трещины серебра и микротрещины. Поверхность приобретает матовый оттенок, сцинтиллятор теряет прозрачность, его световой выход уменьшается. Причинами происходящих изменений могут быть напряжения, возникающие в полимерной матрице в процессе синтеза (из-за фиксированного расположения макромолекул, которое не является равновесным), миграция низкомолекулярных соединений из объема к поверхности и термоокислительные процессы, протекающие при повышенных температурах.

Проблема радиационной стойкости, связанная с особыми условиями работы сцинтилляторов, является предметом многочисленных исследований, и за последние годы накоплен значительный объем экспериментальных данных. Для кристаллов создание собственных дефектов при облучении может приводить к окрашиванию и, следовательно, к потере их прозрачности. Наряду с этим может происходить радиационно-наведенное изменение центра свечения и, в результате, падение сцинтилляционного выхода.

Однако, несмотря на достаточно большое число экспериментальных исследований, связанных с радиационно-стимулированными изменениями сцинтилляционных свойств щелочно-галоидных кристаллов, механизм радиационных изменений светового выхода недостаточно изучен, главным образом, ввиду большого разброса дозовых зависимостей светового выхода исследованных образцов. Этот разброс обусловлен высокой структурной чувствительностью радиационной стойкости [1, 3].

Методы выращивания кристаллов, используемых в качестве сцинтилляторов, еще далеки от совершенства и не позволяют получать образцы с хорошо воспроизводимыми физическими свойствами. Это приводит к разбросу экспериментальных данных, имеющихся в литературе, о характеристиках флуоресценции, чувствительных к структурным дефектам и примесям. Поэтому экспериментальные данные о радиационных изменениях сцинтилляционных кристаллов могут сильно различаться даже для “хороших” образцов в зависимости от плотности дислокаций и концентрации затравочных пор. Это обстоятельство затрудняет исследование механизмов радиационных повреждений кристаллов. Изучение этих механизмов требует специальных экспериментов, например, с повышением плотности дислокаций путем приложения к образцу механического напряжения, например, в условиях одноосного растяжения [1].

Требования к сцинтилляторам настолько разнообразны, что, как показывает анализ, нет такого материала, который являлся бы оптимальным одновременно для всех применений. Стабильность некоторых характеристик (таких, например, как пространственная и химическая однородность, стойкость и механическая прочность, зависимость изменения световыхода от времени и температуры) должна быть заведомо известна или подконтрольна. Нечувствительность к воздействию окружающей

среды, влаги и света также является желательным свойством.

В дальнейшем под деградацией сцинтилляционного детектора мы будем понимать сложный комплекс химических и физических процессов, происходящих под влиянием окружающей среды, при его хранении, эксплуатации и переработке планируемого срока службы, приводящий к необратимому изменению и ухудшению регистрирующих свойств в процессе работы детектора.

Исследовать процесс деградации сцинтиллятора или детектора на его основе можно двумя путями. Первый путь связан с оценкой значения вероятности безотказной работы сцинтилляционных детекторов. Трудность этого пути состоит не только в необходимости проведения большого количества длительных и дорогостоящих испытаний, но также и в том, что разработанные статистические методы их оценки для данного типа изделий неприменимы из-за ограниченного серийного выпуска (сотни, в отдельных случаях тысячи штук). Второй путь основан на построении математической модели деградации сцинтилляционных детекторов.

1. Цели работы. Основными целями данной работы являются:

- изучение механизмов термической, химической, механической, радиационной и структурной деградации сцинтилляционных детекторов;
- разработка подходов к моделированию термической, химической, механической, радиационной и структурной деградации сцинтилляционных детекторов;
- разработка обобщенных микро-мезо-макро определяющих соотношений, которые могут быть использованы для расчетов кинетики изменения во времени напряжений в сцинтилляторах, а также повреждаемости сцинтилляционных материалов детекторов, которые находятся в неустановившемся и установившемся режимах работы в условиях воздействия влаги, кислорода воздуха, температуры и ионизирующих излучений;
- установление связи между усадкой, разбуханием, температурным расширением, радиационным распуханием, явлением ползучести, процессом повреждаемости, и перераспределением напряжений и развитием деградации сцинтилляционных детекторов во времени;
- разработка программного обеспечения в форме компьютерных структурных моделей для анализа во времени напряженного состояния в детекторах, для анализа прочности и длительной прочности, для обеспечения безопасной работы и прогнозирования срока их службы;
- формулировка практических рекомендаций, которые базируются на результатах компьютерного моделирования детекторов, для усовершенствования сцинтилляционных материалов и конструкций, уменьшения деградации детекторов и увеличения их времени эксплуатации.

2. Механизмы деградации. В отдельном сцинтилляционном материале достаточно сложно обеспечить комбинацию высокой прочности и долговременной стабильности с высоким световым выходом. Так как детектору свойственна склонность к разрушению под действием высоких температурных,

механических, диффузионных и радиационных напряжений [1-3], то главной проблемой конструкции детектора с плоской геометрией является необходимость обеспечения стабильной механической структуры. Напряжения, возникающие в детекторе, зависят от свойств материала, условий работы и геометрии конструкции. Так, детектор может быть оперт наполовину или оперт на пористый субстрат; также он может быть жестко заделанным или загерметизированным по периметру. Таким образом, напряжения в сцинтилляционных детекторах могут возникать от пространственных и временных градиентов температуры, а также от внешних нагрузок. Напряжения, обусловленные градиентами температур, а также разностью между коэффициентами температурного расширения и модулями Юнга материалов системы в виде сцинтиллятора, сочлененного с фоточувствительным элементом, будут возрастать с ростом площади системы. А это, в свою очередь, будет ограничивать желание максимизировать результаты работы детектора, увеличивая его площадь. Таким образом, длительная прочность и срок эксплуатации детектора сильно зависят от влияния температуры, так как подвод тепла и охлаждение могут привести к высоким температурным напряжениям. Кроме этого, необходимо учитывать, что системы в виде сцинтиллятора, сочлененного с фоточувствительным элементом, являются механически нагруженными под действием собственного веса, а также могут находиться под нагрузками, которые возникают во время работы, при необходимом выравнивании системы. Вместе с герметизирующим материалом, необходимым для краев детектора, эти факторы могут быть причиной высоких механических напряжений, которые могут передаваться хрупким элементам системы. Таким образом, очень важным для структурного анализа системы в виде сцинтиллятора, сочлененного с фоточувствительным элементом, является изучение термоупругих деформаций и температурных напряжений в системах. Но этого недостаточно для полного понимания механизмов деградации сцинтилляционных детекторов во времени и причин снижения их времени эксплуатации. Поэтому необходимо дополнительно к вышесказанному идентифицировать явление, которое зависит от времени и связано с химической, радиационной и структурной деградацией сцинтилляционных детекторов во времени. Этот феномен может быть исследован экспериментально.

Первое. Активность влаги в детекторе, как правило, имеет место в тех областях, где сцинтилляционный материал контактирует с окружающей средой. Поэтому особый интерес для практики имеет исследование диффузии влаги в некоторых сцинтилляционных материалах. Скорость химической диффузии влаги зависит от структуры, состава и дефектов микроструктуры сцинтилляционного материала. Также стоит учитывать, что в пластмассовых сцинтилляторах, кроме термического расширения, присутствует и химическое расширение, обусловленное разбуханием сцинтиллятора из-за диффузии влаги. Как было выяснено ранее [2], это расширение дает дополнительный вклад в общее расширение сцинтилляционного материала.

Таким образом, во время работы детектор находится под действием гра-

диента влаги и подвергается химически обусловленному деформированию вдоль толщины. Это явление вызывает появление диффузионных напряжений, которые в итоге могут привести к разрушению детектора. Эти химически наведенные в пластмассовых сцинтилляторах напряжения зависят от степени разбухания материала и геометрии системы. Таким образом, разбухание сцинтиллятора из-за диффузии влаги может быть причиной деградации детектора и уменьшения срока его службы. Вместе с тем, в литературе остается открытым вопрос о нахождении связи между диффузионными напряжениями в пластмассовых сцинтилляторах и концентрацией влаги [2].

Второе. В случае, когда сцинтилляционный материал контактирует с окружающей средой, может иметь место также активность кислорода воздуха в детекторе. Например, диффузия кислорода в пластмассовый сцинтиллятор может привести к усадке материала и к появлению дополнительных химически обусловленных напряжений [2]. Этот феномен может быть объяснен, если взять во внимание градиент концентрации кислорода по толщине детектора.

Таким образом, во время работы детектор может находиться под действием градиента концентрации кислорода и подвергаться усадке, что вызывает появление и перераспределение диффузионных напряжений. Последние зависят от усадки сцинтилляционного материала и геометрии системы в виде сцинтиллятора, сочлененного с фоточувствительным элементом. Таким образом, усадка пластмассового сцинтиллятора из-за диффузии кислорода может быть причиной деградации детектора и уменьшения срока его службы. Вместе с тем, в литературе не обсуждался вопрос о связи между диффузионными напряжениями в пластмассовых сцинтилляторах и концентрацией кислорода [2].

Третье. Термическая ползучесть сцинтилляционного материала также может вызывать деградацию детектора во времени и влиять на уменьшение времени его эксплуатации. Для кристаллических сцинтилляторов термическая ползучесть оказывается заметной при повышенных температурах, а для пластмассового сцинтиллятора термическая ползучесть заметна даже при комнатной температуре. Известно [3], что деформация ползучести поликристаллических сцинтилляторов связана с диффузией атомов разнообразных примесей и дефектов в кристалле. Как правило, на границах зерен материала присутствуют дефекты. Скорости различных миграционных процессов, ползучести и роста дефектов на границах зерен могут контролироваться с помощью коэффициента диффузии наиболее медленной примеси или ее концентрации.

Обычно результаты экспериментального изучения термической ползучести сцинтилляционного материала представляют в виде графиков (рис. 1), отображающих зависимость от времени деформаций ползучести при постоянных напряжениях и температуре. Эти графики называют кривыми ползучести. Вид кривых ползучести зависит от напряжения и температуры, при которых испытывался образец из сцинтилляционного материала. Как правило, испытания проводят в условиях одноосного растяжения образца. При нагружении образца деформация весьма быстро возрастает от нуля до некоторой величины. После прекращения

роста нагрузки, полная деформация образца возрастает только за счет деформации ползучести, которая увеличивается во времени по закону, отображенному на рис. 1 линией $OABC$. Ординаты этой линии представляют собой величины деформации ползучести для определенного значения времени при фиксированных значениях напряжения и температуры. Тангенс угла наклона касательной к линии $OABC$ с осью абсцисс выражает в масштабе скорость деформации, равную скорости деформации ползучести.

Процесс термической ползучести сцинтилляционного материала можно разделить на три стадии, относящиеся на рис.

1 к трем областям (I, II и III). В первой стадии (участок OA) скорость деформации ползучести постепенно уменьшается. Данное уменьшение скорости может быть объяснено взаимодействием механического упрочнения и термического разупрочнения. В первой стадии преобладает механическое упрочнение, связанное с ростом деформации ползучести. Во второй стадии (участок AB) устанавливается равновесие между механическим упрочнением и термическим разупрочнением. Процесс ползучести протекает с минимальной скоростью, постоянной во времени. В третьей стадии (участок BC) скорость деформации ползучести постоянно возрастает, пока не наступает разрушение в точке C (рис. 1). Заметим, что самая простая аппроксимация кривой ползучести $OABC$ соответствует прямой линии AD . В этом случае вместо трех стадий процесса ползучести сцинтилляционного материала рассматривается только лишь установившаяся стадия.

Таким образом, термическая ползучесть сцинтиллятора может быть причиной деградации детектора и уменьшения срока его службы. Вместе с тем, в литературе отсутствуют публикации с анализом напряженного состояния в сцинтилляционных детекторах, функционирующих в условиях термической ползучести.

Четвертое. Итак, системы в виде сцинтиллятора, сочлененного с фоточувствительным элементом, часто функционируют в условиях высоких химических градиентов кислорода и влаги в комбинации с повышенной температурой и необратимыми деформациями ползучести, зависящими от времени. Даже в начальной стадии процесса ползучести кристаллических сцинтилляторов, дислокации и атомы примесей сосредотачиваются на границах зерен в форме каверн. Микроскопические каверны на границах зерен увеличиваются и объединяются, а дислокации, примеси и поры перемещаются к границам зерен. При этом на границах зерен начинается формирование микротрещин. Рост и слияние этих микротрещин приводит к разрушению кристаллических сцинтилляторов в финальной стадии процесса термической ползучести. Отметим, что микротрещины формируются с преимущественной ориентацией, часто в направле-

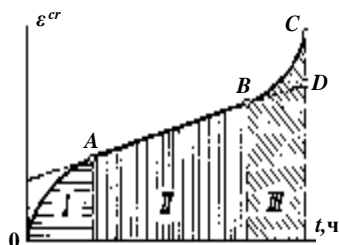


Рис. 1. Кривая термической ползучести в условиях одноосного растяжения при постоянном напряжении и температуре

нии, перпендикулярном к направлению действия максимального главного напряжения. Таким образом, деформации термической ползучести изменяют микроструктуру кристаллических сцинтилляторов за счет дислокаций, примесей и пор в начальной стадии, микроскопических каверн при дальнейшем деформировании и за счет микротрещин с преимущественной ориентацией в финальной стадии процесса ползучести. При этом, скорость роста уже существующих микроскопических каверн и микротрещин на границах зерен, а также скорость

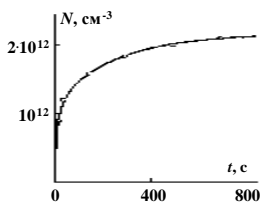


Рис. 2. Накопление субмикротрещин в режиме действия постоянного растягивающего напряжения для образцов из поливинилбутираля [4]

образования новых микродефектов, существенно зависят от интенсивности процесса ползучести. С другой стороны, рост микроскопических каверн и микротрещин также оказывает влияние на развитие термической ползучести кристаллических сцинтилляторов. Это влияние начинается на начальной и установившейся стадии ползучести и становится заметным на третьей стадии, которая предшествует разрушению. При этом заметим, что на третьей стадии ползучести скорость деформации ползучести увеличивается вплоть до разрушения (вязкий тип разрушения). Разрушение вследствие ползучести без роста скорости деформации (хрупкий тип разрушения) также может наблюдаться в кристаллических сцинтилляторах.

Накопление повреждаемости в пластмассовом сцинтилляторе в условиях термической ползучести во многом идентично аналогичному процессу в кристаллическом сцинтилляторе. Например, рис. 2 иллюстрирует увеличение количества субмикротрещин с течением времени t в условиях одноосного растяжения образца из полимерного материала [4].

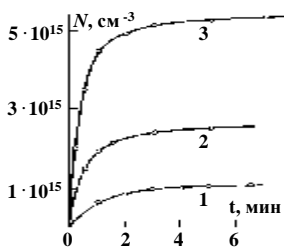


Рис. 3. Накопление субмикротрещин в образце из капрона при действии различных напряжений (в МПа): 1 — 125; 2 — 140; 3 — 155 [4]

повреждаемости в полимере происходит более интенсивно при увеличении величины приложенного напряжения (рис. 3). Таким образом, термическая ползучесть и деградация сцинтиллятора, обусловленная ростом повреждаемости материала, происходят одновременно и влияют друг на друга. К сожалению, теоретических и численных исследований повреждаемости вследствие термической ползучести в системах в виде сцинтиллятора, сочлененного с фоточувствительным элементом, в литературе не имеется.

Пятое. Ионизирующее излучение, действующее в течение длительного периода времени,

вызывает значительные нарушения кристаллической решетки кристаллических сцинтилляторов, а также заметные изменения в полимерной матрице пласт-

массовых сцинтилляторов, что существенно изменяет физико-механические свойства сцинтилляционных материалов. В результате этих изменений происходит радиационное распухание сцинтилляторов, приводящее к возникновению радиационных напряжений, и, как следствие, радиационная деградация сцинтилляционных детекторов. Например, на рис. 4 представлено увеличение количества субмикротрещин с течением времени в условиях одноосного растяжения образца из полимерного материала без дополнительного ультрафиолетового облучения (1), а также в сочетании с ультрафиолетовым облучением (2). Видно, что ультрафиолетовое облучение приводит к возрастанию интенсивности процесса накопления повреждаемости в полимере. Очевидно, что радиационное распухание и накопление повреждаемости в сцинтилляционном материале под воздействием ионизирующего излучения протекают параллельно друг другу. К сожалению, в литературе отсутствуют работы, посвященные математическому моделированию радиационного распухания сцинтилляционных детекторов и повреждаемости сцинтилляторов под воздействием ионизирующего излучения.

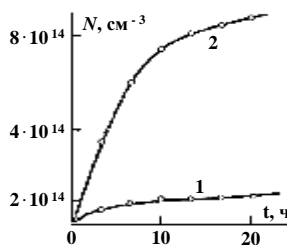


Рис. 4. Накопление субмикротрещин в режиме действия только постоянного растягивающего напряжения в 80 МПа (1), а также совместного действия напряжения в 80 МПа и ультрафиолетового облучения (2) в образцах из полипропилена [4]

циклического воздействия ионизирующего излучения, что, в свою очередь, в сочетании с механическими напряжениями вызывает циклическую радиационную ползучесть материалов и повреждаемость вследствие радиационной усталости. При этом скорости циклической ползучести и накопления повреждаемости в сильной степени зависят от характеристик цикла, напряженного состояния, плотности потока излучения и температуры материала. Процессы циклической радиационной ползучести материалов и повреждаемости вследствие радиационной усталости могут быть идентифицированы на основе данных базовых экспериментов в условиях циклического симметричного нагружения с постоянными значениями амплитудного напряжения и плотности потока излучения (рис. 5) в виде связи деформации циклической ползучести ϵ^c , а также параметра повреждаемости ψ с числом циклов N [4].

Очевидно, что циклическая радиационная ползучесть и накопление повреждаемости вследствие радиационной усталости в сцинтилляционном материале оказывают взаимное влияние друг на друга. В тоже время, в литературе отсутствуют исследования, посвященные математическому моделированию циклической радиационной ползучести сцинтилляционных детекторов и повреждаемости сцинтилляторов вследствие радиационной усталости.

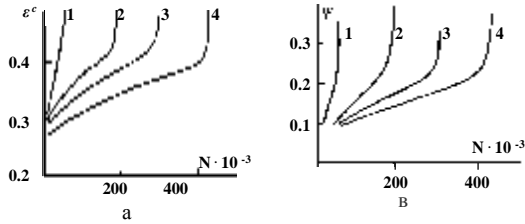


Рис. 5. Кривые циклической радиационной ползучести (а) и накопления повреждаемости вследствие радиационной усталости (в) в условиях циклического симметричного нагружения с постоянными значениями амплитудного напряжения σ_1 (1), σ_2 (2), σ_3 (3), σ_4 (4) и плотности потока излучения, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4$

3. Новый обобщенный подход. Перейдем к рассмотрению определяющих соотношений, которые могут быть использованы для расчетов кинетики изменения во времени напряжений в сцинтилляторах, а также повреждаемости сцинтилляционных материалов детекторов, которые находятся в условиях воздействия влаги, кислорода воздуха, температуры и ионизирующих излучений. Тензор деформаций ε_{ij} в сцинтилляторах включает упругую составляющую ε_{ij}^e , температурную составляющую ε_{ij}^T , разбухание ε_{ij}^d из-за диффузии влаги, усадку ε_{ij}^o из-за диффузии кислорода воздуха, радиационное распухание ε_{ij}^r , а также тензор деформаций термической ползучести ε_{ij}^{cr} и тензор деформаций циклической радиационной ползучести ε_{ij}^c , т.е.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^d + \varepsilon_{ij}^o + \varepsilon_{ij}^r + \varepsilon_{ij}^{cr} + \varepsilon_{ij}^c. \quad (1)$$

Упругие деформации следуют обобщенному закону Гука. Закон температурного расширения имеет вид

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha_{ij}^T T, \quad (2)$$

а закон радиационного распухания –

$$\varepsilon_{ij}^r = \alpha_{ij}^r \Phi, \quad (3)$$

где T и Φ – температура и флюенс ионизирующего излучения. Разбухание материала ε_{ij}^d определяется соотношением

$$\varepsilon_{ij}^d = \alpha_{ij}^d C_1, \quad (4)$$

а усадка –

$$\varepsilon_{ij}^o = -\alpha_{ij}^o C_2. \quad (5)$$

Здесь α_{ij}^T , α_{ij}^r , α_{ij}^d , α_{ij}^o – тензоры постоянных сцинтиллятора. Концентрация влаги C_1 и концентрация кислорода воздуха C_2 находятся интегрированием соответствующего дифференциального уравнения Фика второго рода, дополненного начальными и граничными условиями [5]. Компоненты

тензора деформаций термической ползучести, включая соответствующий параметр повреждаемости материала, представлены в [6-8], а компоненты тензора деформаций циклической радиационной ползучести, включая параметр повреждаемости вследствие радиационной усталости, – в [9-12].

Анализ перераспределения напряжений в сцинтилляционных детекторах во времени на основе предложенных выше определяющих уравнений связан с необходимостью решения физически нелинейных трехмерных, двумерных и одномерных начально-краевых задач. Последние могут быть рассмотрены с использованием постановок, численных методик и программного обеспечения, представленных в [13-17]. Примеры численных исследований напряженного состояния в сцинтилляционных детекторах будут рассмотрены в следующей статье.

Список литературы: 1. *Глобус М. Е., Гринева Б. В.* Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы. – Х.: Акта. 2001. – 408 с. 2. *Гринева Б. В., Сенчишин В. Г.* Пластмассовые сцинтилляторы. – Х.: Акта, 2003. – 324 с. 3. *Гринева Б.В., Семиноженко В.П.* Сцинтилляционные детекторы ионизирующих излучений для жестких условий эксплуатации. —Х.: Основа, 1993. – 155 с. 4. *Тамуж В.П., Куксенко В.С.* Микромеханика разрушения полимерных материалов. – Рига: Зинатне, 1978. – 294 с. 5. *Crank J.* The Mathematics of Diffusion. Second Edition. – Oxford: Oxford University Press, 1999. 6. *Betten J., Sklepuss S., Zolochovsky A.* A microcrack description of creep damage in crystalline solids with different behaviour in tension and compression. Int. J. Damage Mech. – 1998. – 8. – PP.197-232. 7. *Zolochovsky A., Obataya Y.* Tension-compression asymmetry of creep and unilateral creep damage in aluminum for isothermal and nonisothermal processes. JSME Int. J. – 2001. – 44A. – PP.100-108. 8. *Zolochovsky A., Voyiadjis G.Z.* Theory of creep deformation with kinematic hardening for materials with different properties in tension and compression. Int. J. Plast. – 2005. – 21. – PP.435-462. 9. *Breslavsky D. V., Morachkovsky O. K., Zolochovsky A.A.* Dynamic creep behaviour of structures //Structural Dynamics-EURODYN'93, Moan et al. (Eds.). – Rotterdam: Balkema, 1993. – PP.795-801. 10. *Zolochovsky A., Itoh T., Obataya Y.* A continuum damage mechanics model for multiaxial low cycle fatigue failure. Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2001. – 12. – PP.1-19. 11. *Zolochovsky A., Obataya Y., Itoh T., Betten J.* A continuum damage mechanics model with the strain-based approach to biaxial low cycle fatigue failure. Engineering Research. – 2000. – 66. – PP.67-73. 12. *Zolochovsky A., Obataya Y., Betten J.* Critical plane approach with two families of microcracks for modeling of unilateral fatigue damage. Engineering Research. – 2000. – 66. – PP.49-56. 13. *Zolochovskij A. A.* Creep of structural elements from materials with characteristics depending upon type of loading. Technische Mechanik. – 1988. – 9. – PP. 177-184. 14. *Zolochovskii A. A., Koz'min Yu. S.* Nonlinear deformation of rectangular thick-walled shells consisting of material that responds differently to tension and compression. International Applied Mechanics. – 1993. – 29. – PP. 624-630. 15. *Kozmin Ju. S., Zolochovskij A. A.* Nonlinear deformation of thick-walled shells having a square base and made of materials whose properties are dependent on the type of loading. Technische Mechanik. – 1990. – 11. – PP. 214-221. 16. *Zolochovsky A., Hop J. G., Servant G., Foosnaes T., Øye H. A.* Creep and sodium expansion in a semigraphitic cathode carbon //Light Metals, Crepeau P. (Ed.). – Warrendale: The Minerals, Metals and Materials Society, 2003. – PP.595-602. 17. *Zolochovsky A., Galishin A., Sklepuss S., Voyiadjis G. Z.* Analysis of creep deformation and creep damage in thin-walled branched shells from materials with different behavior in tension and compression. International Journal of Solids and Structures. – 2007. – 44. – PP. 5075-5100.

Поступила в редколлегию 04.02.08