

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Рентгеновская и нейтронная радиография и томография в научных исследованиях и промышленности

А.Ю. Пресняков, В.И. Микеров, О.А. Герасимчук, Д.И. Юрков

Описывается современное состояние работ в области радиографии и томографии с использованием рентгеновского и нейтронного излучений. Методы широко применяются в научных исследованиях и промышленности благодаря высокой проникающей способности излучений, различному механизму взаимодействия с веществом, отсутствию разрушения образца и достаточному для широкого круга задач пространственному разрешению. Радиационные методы широко используются в ядерном топливном цикле, при изучении работы электрических элементов и материалов в различных условиях, в дефектоскопии, в биологии и в других областях науки и техники.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, нейтронное излучение, радиография, томография, нейтронные генераторы

PACS numbers: 28.20.Pr, 61.05.–a, 83.85.Hf

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.11.039598>

Содержание

1. Введение (618).
 2. Основные области применения (618).
 - 2.1. Ядерный топливный цикл.
 - 2.2. Электрические элементы.
 - 2.3. Другие промышленные изделия.
 - 2.4. Динамическая радиография.
 - 2.5. Исследование материалов.
 3. Обратное проектирование (626).
 4. Нейтронные генераторы в радиационной радиографии (627).
 5. Заключение (627).
- Список литературы (628).

1. Введение

Радиография и томография, использующие рентгеновское и нейтронное излучения, относятся к радиационным методам неразрушающего контроля и исследования материалов и различных изделий. Основными задачами применения методов являются контроль качества промышленных изделий в процессе их производства, их техническое диагностирование, дефектоскопия и контроль геометрических характеристик изделия, научные исследования, досмотр грузов, контроль людей и ручной клади и т.п. Уникальные возможности методов используются при разработке технологических процес-

сов, новых изделий и материалов, контроле особо ответственных узлов и механизмов. Методы также часто используются для проверки объектов, когда возможные в них дефекты нельзя обнаружить при помощи визуального осмотра, и применяются для обнаружения локальных нарушений сплошности, включений, разнотности, отклонений геометрической структуры.

Благодаря высокой проникающей способности изображения, полученные при использовании радиационной радиографии и томографии, содержат наиболее полную информацию о внутренней структуре контролируемых объектов.

В представленном обзоре рассматриваются применения методов в ядерном топливном цикле, в исследовании электрических элементов, при проверке качества лопастей турбинных лопаток, работы двигателей внутреннего сгорания, в исследовании материалов. Рассматриваются вопросы обратного проектирования, радиографии с временным и пространственным разрешением, одновременного использования рентгеновского и нейтронного излучений.

Те, кто интересуется вопросами, относящимися к радиационной радиографии и томографии, могут обратиться к [1–4] и к сайту Международного общества по нейтронной радиографии (International Society for Neutron Radiography) [5].

2. Основные области применения

2.1. Ядерный топливный цикл

Своевременный радиографический и томографический контроль позволяет проверить качество деталей, выявить реальное состояние эксплуатируемого объекта, обеспечить безопасность и надёжность работы атомных станций, предотвратить возможные аварии и ката-

А.Ю. Пресняков^(1,а), В.И. Микеров^(1,2,б),О.А. Герасимчук^(1,в), Д.И. Юрков^(1,2,д)

⁽¹⁾ Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,

ул. Сушѣвская 22, 127030 Москва, Российская Федерация

⁽²⁾ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ",
Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация

E-mail: ^(а) presnyakov_aleks@mail.ru, ^(б) vmikero250846@yandex.ru,

^(в) oleg.gerasimchuk@bk.ru, ^(д) dmitry_yurkov@mail.ru

Статья поступила 6 июля 2023 г., после доработки 17 ноября 2023 г.

строфы. Нейтронные и рентгеновские методы являются взаимно дополняющими средствами, используемыми при разработке и анализе ядерных материалов и пр.

Совместное применение нейтронного и рентгеновского излучений в ядерном топливном цикле обусловлено существенным различием их взаимодействия с веществом. Химические элементы с низкой электронной плотностью плохо различаются в рентгеновских радиографических изображениях. В то же время ослабление нейтронов веществом не зависит от его электронной плотности. Таким образом, водород, например, может быть обнаружен внутри металлического контейнера, поскольку линейный коэффициент ослабления тепловых нейтронов водородом составляет $3,44 \text{ см}^{-1}$, а для свинца он равен $0,38 \text{ см}^{-1}$.

Осколочная радиография (f-радиография) [6] является уникальным методом анализа делящихся радионуклидов в самых различных породах. Она позволяет определить количественное содержание делящихся радионуклидов, их пространственное распределение, а также формы нахождения в исследуемом объекте. Метод является инструментальным, даёт возможность выполнять анализ без химической подготовки и разрушения пробы, фиксировать пространственное размещение тория, урана, плутония и других элементов с высокой чувствительностью. Осколочная радиография базируется на явлении деления ядер тория, урана, плутония в поле тепловых нейтронов в ядерном реакторе и регистрации осколков деления (треков). Трековые детекторы [7] фиксируют следы от осколков деления, которые после соответствующей обработки наблюдаются в оптический микроскоп.

Областями применения радиационной радиографии в ядерном топливном цикле являются (рис. 1):

- исследование состава и минералогии урановой руды;
- разработка и испытание топливных элементов (ТВЭЛов) и материалов;
- проверка качества сварных швов;
- проверка корпусов ядерных реакторов;
- обращение с ядерными отходами.

2.1.1. Исследование состава руды. Радиография и томография используются в качестве диагностического средства при получении данных о геологическом объёмном составе горной породы, в частности, в кернах, добытых



Рис. 1. Основные стадии ядерного топливного цикла [8].

из скважин. Микрокомпьютерная рентгеновская томография позволяет получать результаты в течение одного часа, обеспечивая пространственное разрешение не хуже 6 мкм, и при этом определять в различных породах содержание золота, пирита, циркона, браннерита. Уранит главным образом встречается в кварцевой матрице и углеродосодержащих составляющих породы в виде круглых зёрен размером до 200 мкм [9].

Совместное применение 2D- и 3D-методов рентгеновского исследования способствует пониманию генезиса ураносодержащих руд [10].

Использование радиографии при изучении рудоносных пород Малиновского уранового месторождения выявило наличие урана в составе как аутигенных, так и терригенных компонентов пород; присутствие тонко рассеянной "безминеральной" формы урана; участие одновременных эпигенетических процессов в формировании состава руд месторождения [11]. Последовательность образования и преобразования руд позволяет объединить их в единый подтип мезозойских инфильтрационных месторождений Западной Сибири.

Комбинация f-радиографии и энергодисперсионной электронной микроскопии (SEM-EDS, Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) обеспечивает эффективный метод определения соединений урана, которые влияют на его подвижность. Для этого создаются очень тонкие пластины образца и облучаются в ядерном реакторе. Облучённые образцы производят треки, наблюдаемые в микроскоп. Изображения треков определяют области образца с повышенным содержанием урана, в дальнейшем исследуемые с помощью SEM-EDS, спектры которой используются для определения минералогии рассматриваемых областей. В качестве примера можно привести исследования, проведённые на месте расположения бывшего завода по производству урана в Гранд-Джанкшен (Grand Junction, штат Колорадо, США) [12]. Результаты исследования обоими методами показали, что местный уран покрыт Al/Si-гелем и гипсом. Зоны меньшего содержания урана заполнены солями типа эвапорита. Установление минералогии урана помогает определению скоростей выброса урана в подземные воды.

2.1.2. Контроль обогащения топливных стержней. Природный уран состоит на 99,284 % из изотопа U-238. Содержание изотопа U-235 в природном уране составляет всего 0,711 %. U-235 является единственным изотопом в природе, присутствующим в существенных количествах и взаимодействующим с тепловыми нейтронами. Распределение изотопов урана в образце определяется либо с помощью радиографии, либо с помощью гамма-спектрометрических измерений [13]. Исторически первым был разработан метод измерения обогащения, основанный на том, что интенсивность гамма-излучения U-235 из образцов урана достаточной толщины пропорциональна их обогащению [14]. Радиографические методы, как правило, дают возможность определять распределение микронеоднородностей по поверхности и объёму образца. Радиография в тепловых нейтронах позволяет определять распределение в проработавших топливных стержнях химических элементов, таких как Nd, Gd, Pu и др. [15]. Различие поперечных сечений поглощения U-235 и U-238 обеспечивает определение степени обогащения топлива в таблетках элемента неразрушаю-

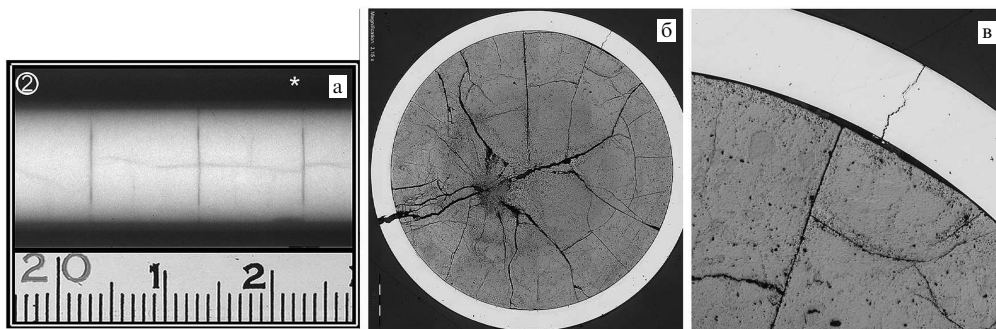


Рис. 2. Радиографическое изображение отработавшего топливного элемента в тепловых нейтронах. В топливе появляются трещины (а), пустоты (б). Деструкции подвергаются также корпуса топливных стержней (в) [20].

щим образом. Контраст изображения таблеток топливного элемента различной плотности зависит от энергии нейтронов [16]. При энергии больше 19,7 мэВ нейтроны позволяют обнаруживать таблетки с наименьшей плотностью. Сам стержень характеризуется максимальным пропусканием. При энергии нейтронов менее 6 мэВ наименее плотные таблетки проявляются в радиографическом изображении как наиболее тёмные. Чем темнее изображение, тем больше обогащение.

2.1.3. Разработка и контроль топливных элементов. В России происходит разработка новых видов топлива для атомных станций: топлива для реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, смешанного топлива и ТВЭЛов для плавучих энергоблоков [17]. Проводятся исследования поведения топлива в процессе эксплуатации топливных стержней, которые работают в экстремальных условиях, характеризующихся высокими уровнями энерговыделения, температуры, давления и радиации.

Для получения лицензии, необходимой для запуска ядерного реактора в работу, он проверяется, в частности, на безопасность эксплуатации топливных элементов. Высокая чувствительность к содержанию U-235 в радиографических исследованиях при использовании медленных нейтронов объясняется их высокой проникающей способностью в образцах природного урана и различными ослабляющими способностями его изотопов. Нейтронные радиографические методы позволяют исследовать распределение делящегося материала в топливных стержнях без нарушения их целостности.

В отличие от нейтронной, рентгеновская радиография для инспекции топливных стержней используется в меньшей степени, в частности, по следующим причинам:

- уран характеризуется высоким коэффициентом ослабления рентгеновского излучения (около 50 см^{-1} для $E = 150 \text{ кэВ}$);

- для тепловых нейтронов коэффициент ослабления составляет $0,8 \text{ см}^{-1}$;

- в случае тепловых нейтронов U-235 и U-238 имеют значительно отличающиеся ослабляющие способности, что позволяет определять в них содержание этих изотопов;

- рентгеновское излучение не позволяет обнаруживать вещества, сильно поглощающие тепловые нейтроны (бор, литий, диспрозий и гадолиний);

- рентгеновское излучение не обеспечивает количественные измерения содержания водорода в корпусе стержня.

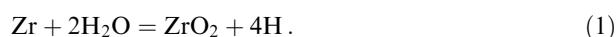
Тем не менее рентгеновская радиография используется для контроля изготовления оболочек тепловыделяющих элементов, определяющих надёжность и безопасность эксплуатации ядерной энергетической установки. Для их инспекции создана станция контроля сварных соединений ТВЭЛов [18], разработанная Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения Сибирского отделения РАН.

Радиационная радиография в течение десятилетий используется для получения изображения топливных элементов по двум основным причинам: для проверки имеющихся запасов и с целью обеспечения их качества. В обзоре [19] были представлены результаты работ по исследованию как свежих, так и облучённых топливных сборок, состоящих из различных материалов и в различных физических формах. Четыре десятилетия развития привели к технологиям, в помощь которых стало возможным получать 3D-изображения гранул UO_2 толщиной 0,5 мм, покрытых внешним слоем.

Важное место в исследовании топливных стержней занимает деструкция содержащегося в них топлива (рис. 2). В топливе появляются трещины (рис. 2а), пустоты (рис. 2б). Деструкции подвергаются также корпуса топливных стержней (рис. 2в).

Циркониевые сплавы — основной материал оболочек ТВЭЛов водо-водяных и кипящих энергетических реакторов. В общем случае сплавы содержат гафний, ниобий, олово, железо, никель, хром. Использование циркония обусловлено малым коэффициентом захвата нейтронов. Радиографическое исследование в тепловых нейтронах (рис. 3) [21] показывает, что выдержка сплава Zr(IV) в водяном паре в течение 8 ч при температуре 800°C приводит к незначительным его изменениям. При отжиге образца в атмосфере с добавлением воздуха наблюдается увеличение изменений, происходит небольшое набухание образца. При отжиге образца в атмосфере с добавлением азота наблюдается значительное набухание образца и сильное увеличение полного поперечного сечения взаимодействия тепловых нейтронов с образцом.

Считается, что безопасность в случае аварии с охлаждающей жидкостью обеспечивается термопластичностью корпуса топливных стержней. Однако окисление корпуса, выполненного из циркония, водяным паром приводит к образованию свободного водорода:



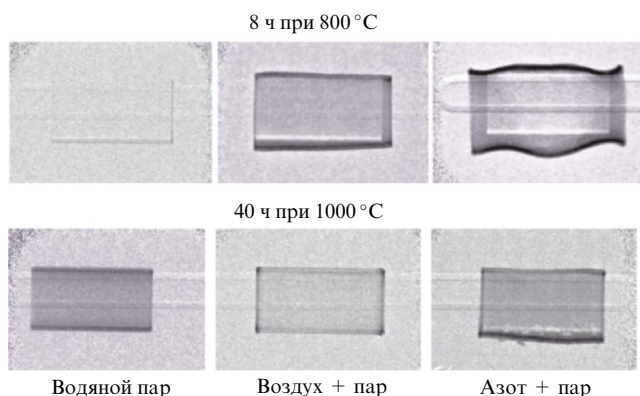


Рис. 3. Нейтронные радиографические изображения образца $Zr(IV)$, помещённого в различные атмосферы с потоком водяного пара 2 г ч^{-1} и азота 10 л ч^{-1} [21].

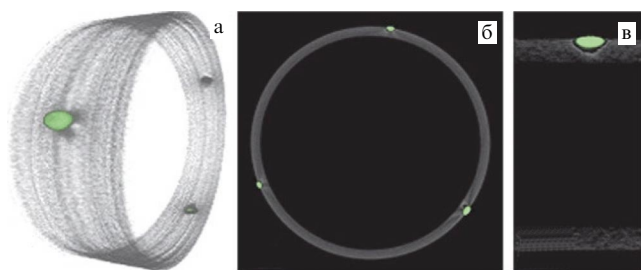


Рис. 4. (а) Реконструированный 3D-объём образца трубы высокого давления из цирконоя (сплава циркония с оловом); (б, в) различные сечения реконструированного объёма [22].

При наличии разрывов в корпусе топливного элемента водород проходит через них и поглощается металлическим цирконием. Поглощение водорода цирконием (рис. 4) существенно снижает его пластичность [22]. Помимо этого, окисление циркония приводит к его охрупчиванию. Таким образом, нейтронная радиография и томография позволяют определять содержание водорода в корпусе топливного элемента качественно и количественно с высокой чувствительностью и точностью.

Образование водородных пузырей в трубах высокого давления из циркониевых сплавов на атомных реакторах является одним из факторов, ограничивающих безаварийную работу реактора [23]. Обнаружение пузырей, определение их размера, а также распределения водорода в окружающей матрице помогает оценить срок службы реактора. Нейтронная томография является средством изучения кинетики образования водородных пузырей.

Сферический элемент, создаваемый для высокотемпературного реактора, выполняется в виде сферы диаметром 6 см [24]. Одним из методов его исследования служит рентгеновская томография, используемая для установления однородности расположения частиц диоксида урана в углеродной матрице и выработки технологического процесса, обеспечивающего центральное расположение частиц в матрице. Результатами рентгеновского томографического анализа было установление количества разделённых в пространстве топливных элементов, которое составило 8500, и их диаметра — 0,5 мм.

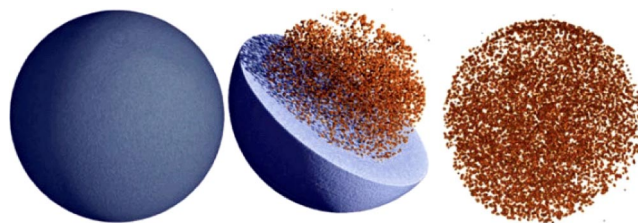


Рис. 5. Изображение графитовой сферы для высокотемпературного реактора и результаты измерений при использовании нейтронной томографии [24].

Другим результатом явилось установление среднего расстояния между частицами топлива и однородности заполнения топливного элемента. Результаты рентгеновских исследований сферических элементов были подтверждены измерениями при использовании нейтронной томографии (рис. 5).

Контроль облучённых топливных элементов — задача, возникающая при разработке новых ядерных реакторов. Проблема заключается в высокой гамма-активности топливных элементов, препятствующей использованию цифровых детекторов и томографических исследований. При этом существенно повышается стоимость измерений. В работе [25] для исследований топливных элементов применялся радиографический реактор малой мощности (250 кВт) со сравнительно малым нейтронным потоком на образец и большим отношением сигнал/фон. В работе была разработана оптическая система, которая обеспечивала использование цифрового детектора за счёт его выведения из нейтронного пучка. Оптическая система состоит из нескольких коаксиальных вложенных зеркал Вольтера и может работать с полихроматическим пучком тепловых нейтронов.

2.1.4. Обращение с отходами атомного производства. Классификация радиоактивных отходов была предложена МАГАТЭ (Международным агентством по атомной энергии) [26]. Отходы низкой и средней активности обычно закатывают в стальные бочки, которые прессуют, заливают бетоном и затем помещают в подземные хранилища. Бетон является пористым материалом и пропускает воду. Важно понимать, как это происходит при хранении ядерных отходов. Нейтронная радиография и томография бетона позволяют визуализировать данный процесс благодаря высокой чувствительности нейтронного излучения к водороду. Нейтроны позволяют измерить такие физические свойства бетона, как пористость, проницаемость, сорбирующие свойства. Целью исследований, проведённых в [27, 28], было улучшение защитных бетонных конструкций путём уменьшения сорбции ими воды и выщелачивания бетона. Сорбционная способность бетона к воде зависит от исходного отношения воды к цементу при его изготовлении и количества дней, прошедших после его отверждения (рис. 6). Чем меньше количества воды используется и чем больше прошло времени после отверждения бетона, тем ниже его сорбционная способность. На рисунке 6 внизу указаны дни после отверждения.

В атомной энергетике бетон используется не только как конструкционный материал, но и как материал биологической защиты. Бетонная смесь обычно состоит из цемента, крупного и мелкого заполнителя, воды и раз-

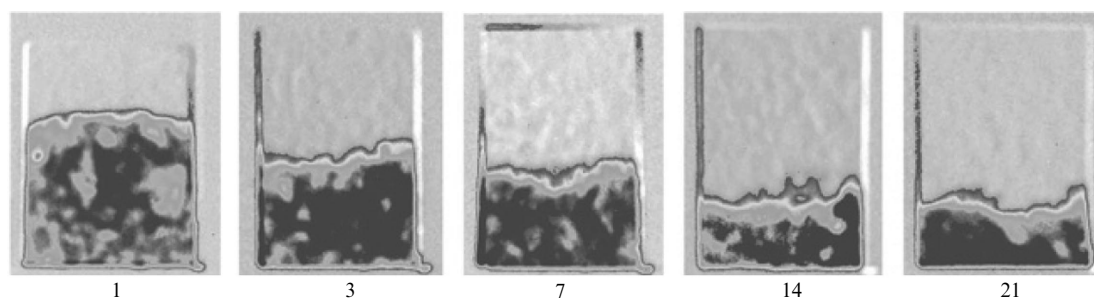


Рис. 6. Радиографические нейтронные изображения образца бетона после отверждения. Под изображениями указано количество дней после отверждения. Чем меньше количество воды используется и чем больше прошло времени после отверждения бетона, тем ниже его сорбционная способность [27, 28].

личных добавок. Исследования свойств бетона были проведены на установке, расположенной на одном из горизонтальных каналов реактора ВВР-К [29]. Изучены образцы бетона трёх марок. Показано распределение пор и трещин в каждом образце. Разница линейных коэффициентов ослабления нейтронного излучения для образцов не превышает 10%. Оценена скорость миграции воды в бетоне. Один из образцов имеет большую скорость проникновения воды по высоте бетона, что говорит о его большей пористости. Скорость миграции воды по высоте этого образца составила $1,4 \text{ мм ч}^{-1}$.

Методы нейтронной радиографии использованы при исследовании процессов застывания цементных паст для постройки хранилищ или захоронений радиоактивных отходов, содержащих металлический алюминий. Исследованы различные составы цементных паст с органическими добавками для подавления процессов газообразования при затвердевании цементных материалов. Рассмотрена кинетика затвердевания цементных паст [30].

Значение имеет и обнаружение радиоактивных материалов. Для этих целей используются два подхода: активный и пассивный. Активный подход предполагает использование источника излучений и в ряде случаев получение изображения исследуемого объекта [31–35]. Такой подход не может использоваться в непосредственной близости от людей и в неконтролируемых зонах обнаружения. Пассивный подход связан с использованием системы детекторов. В противоположность активному подходу, он требует меньше оборудования и значительно дешевле в реализации [36].

2.2. Электрические элементы

2.2.1. Определение содержания воды. Одним из важных применений нейтронной и рентгеновской радиографии в настоящее время является исследование электрических элементов с полимерной электролитической мембраной. Элементы могут применяться как в стационарных, так и мобильных устройствах. Вода в элементах играет важную роль, особенно при низких температурах. С одной стороны, жидкая вода необходима в некоторых количествах, поскольку только влажная мембрана проводит через себя протоны. С другой стороны, содержание воды в газопроводящих каналах и пористые газодиффузионные слои сильно влияют на плотность выделяемой энергии и долговечность используемых материалов.

Высокоскоростная нейтронная томография обеспечивает количественный анализ распределения воды в элементе и позволяет перейти к его компьютерному моде-

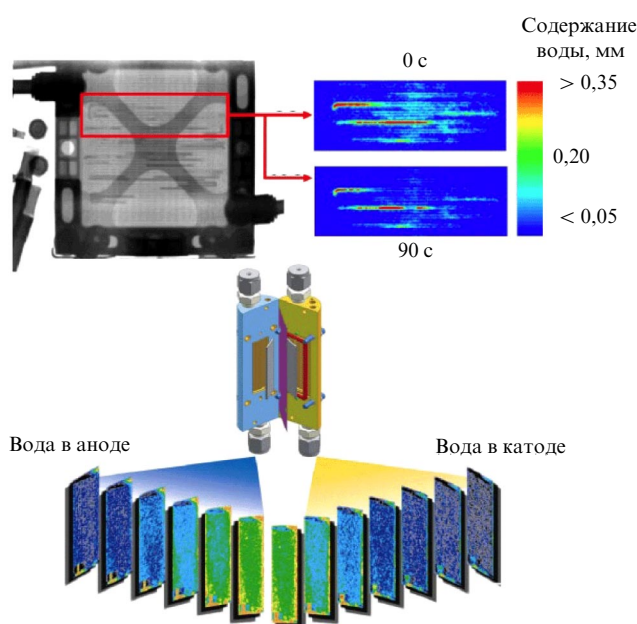


Рис. 7. Нейтронные, радиографические и томографические изображения электрического элемента с полимерной электролитической мембраной. Максимальное распределение воды наблюдается в аноде элемента [38].

лированию и созданию конструкций следующего поколения [37]. Изменение во времени распределения воды в аноде и катоде элемента, полученное с помощью нейтронов, показано на рис. 7 [38]. Горизонтальные линии слева вверху обусловлены жидкой водой,двигающейся по каналам для газа. Справа вверху показано распределение воды в каналах после их переключения с водородного на дейтериевый газ сразу и через 90 с после переключения. Видно, что вода частично исчезла через 90 с и заменена на практически прозрачную тяжёлую воду D_2O . Внизу рисунка показано распределение воды, полученное из томографических измерений тестового элемента. Каждый слайс на рисунке имеет толщину 0,125 мм. Максимальное распределение воды наблюдается в аноде элемента.

Совместное применение нейтронной и рентгеновской радиографии обеспечивает исследование распределения жидкой воды в элементах в реальных условиях их эксплуатации. Нейтроны легко проникают через металлические стенки, в то время как рентгеновское излучение обеспечивает высокое пространственное (порядка 1 мкм) и временное разрешение (на уровне 100 мс) при исполь-

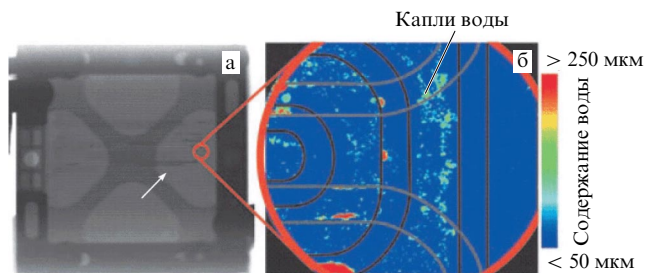


Рис. 8. Радиографические изображения электрического элемента с полимерной электролитической мембраной, полученные с помощью тепловых нейтронов (а) и синхротронного излучения (б). Стрелкой указана область сверловки отверстия [39].

зовании синхротронного источника (рис. 8). Нейтроны проходят через металлические компоненты элемента, чувствительны к воде и позволяют получать изображение всего элемента. Необходимость сверления отверстий в торцевых пластинах корпуса для пропускания через них синхротронного излучения ограничивает поле зрения рентгеновского изображения, но при этом обеспечивает визуализацию капелек воды диаметром несколько микрон [39]. Стрелкой на рис. 8а указана область сверловки отверстия.

2.2.2. Исследование разряда электрической батареи. Изображения на рис. 9 показывают томограммы щелочной электрической батареи в синхротронном и нейтронном излучениях [39]. Изображения (а, в) были получены до разряда, а (б, г) — после него. Рентгеновские томограммы указывают на значительные структурные изменения цинкового порошка (частицы в центре изображений), которые были окислены и частично растворены в КОН-электролите. Катод набух и потрескался из-за уменьшения количества MnO_2 (зона серого цвета) и из-за внедрения водорода.

Дополняющие свойства рентгеновского и нейтронного излучений хорошо проявляются при исследовании литиевых батарей. Поскольку батарея содержит твёрдый

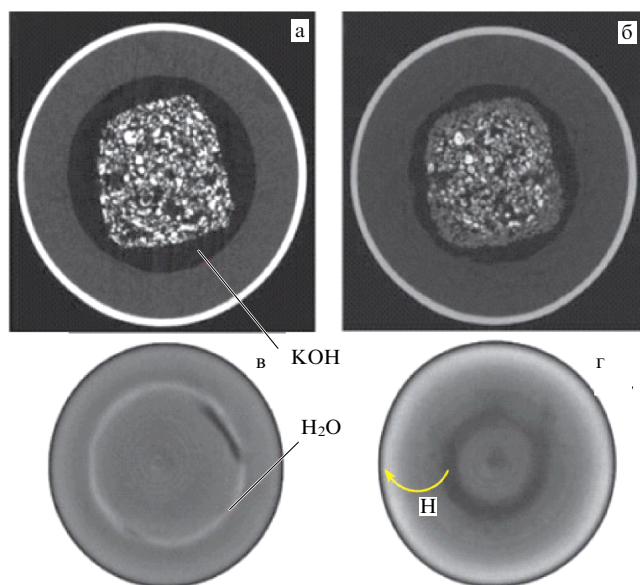


Рис. 9. Томограммы щелочной батареи: (а, б) в синхротронном излучении; (в, г) в нейтронном излучении [39].

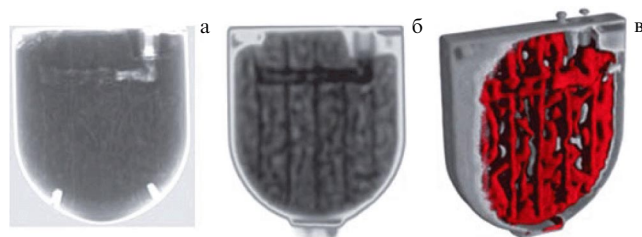


Рис. 10. Радиографические и томографические изображения литиевой батареи: (а) и (б) рентгеновское и нейтронное радиографические изображения; (в) нейтронная томограмма [39].

LiI-электролит, она демонстрирует высокую надёжность и применяется, в частности, в медицине в кардиостимуляторах. Важно, чтобы литиевые батареи стабильно работали в течение длительного времени. Стабильность работы зависит от изменения распределения со временем в батарее лития, исследование которого позволяет оптимизировать работу батареи и продлить срок её службы. Йод благодаря достаточно большому количеству электронов в оболочке атома является высококонтрастным веществом для рентгеновского излучения. В то же время литий хорошо поглощает тепловые нейтроны. Рентгеновское изображение на рис. 10а [39] в основном показывает распределение в батарее йода. Нейтронное изображение на рис. 10б демонстрирует распределение лития. Изображение на рис. 10в является томографическим и показывает объёмное распределение лития. Размер батареи составлял 27 мм.

Процессы, происходящие в ванадиевых батареях, зависят от физических и химических свойств поверхности используемых материалов. Для понимания влияния динамики течения и формирования водородных пузырьков были исследованы различные типы батарей. Получены данные, которые позволяют оптимизировать конструкцию батареи [40].

2.3. Другие промышленные изделия

2.3.1. Турбинные лопатки. Турбинные лопатки используются в газотурбинных двигателях в авиации, судостроении, энергетике. Задача их изготовления является одной из самых наукоёмких и сложных. Лопатка является основной деталью, принимающей на себя весь тепловой удар. От её жаропрочности зависит работа всего двигателя. Рабочая температура лопатки составляет порядка 1000 °С. Температура газа перед турбиной на несколько сотен градусов Цельсия выше точки плавления материала самой лопатки. Уникальность технологии производства лопаток состоит в литье, при котором происходит её направленная кристаллизация. Межремонтный ресурс работы современных лопаток порядка 1000 ч. Срок службы лопаток двигателя ПД-14 (авиационный турбовентиляторный двигатель поколения 5 и 5+) 20000 ч. Стоимость изготовления лопатки авиационного двигателя сравнима со стоимостью легкового автомобиля. Лопатка представляет собой практически идеальный монокристалл с полостями внутри для её охлаждения обычно воздухом, чтобы предотвратить расплавление лопатки при рабочей температуре. Полости создаются за счёт использования керамики, которая после создания полостей разрушается и удаляется через технологические отверстия. Нейтронные изображения

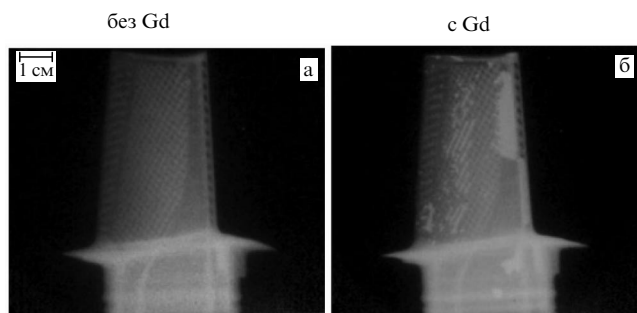


Рис. 11. Нейтронное изображение турбинной лопатки в отсутствие (а) и при наличии (б) гадолиний-содержащей керамики [41].

лопатки без гадолиниевой керамики и с ней показаны на рис. 11 [41]. Когда керамика содержит гадолиний, её остатки в полостях лопатки обнаруживаются с помощью нейтронной радиографии.

2.3.2. Пиротехнические изделия. Пиротехнические изделия являются критическим компонентом выведения космического устройства на орбиту. Эти устройства используются для зажигания, разделения ступеней, развращения спутника и т.д.

Французская компания Dassault Aviation разрабатывает и производит пиротехнические компоненты для программы ARIANE 5. Перед стартом каждое пиротехническое устройство тщательно тестируется. На ARIANE 5 в общей сложности устанавливается около 800 различных пиротехнических устройств [42–44]. Запуск может быть гарантирован при условии высокого качества устанавливаемых устройств. Нейтронная радиография в нейтронах низких энергий представляет собой уникальный метод контроля состояния таких объектов и широко используется для этих целей.

Очевидно, что отсутствие взрывчатых веществ в пиротехническом устройстве приводит к сбою в его работе. В [44] рассматривается возможность использования для решения этой задачи дейтерий-третиевого нейтронного генератора совместно с 12-битной ПЗС (прибор с зарядовой связью) камерой в качестве регистратора. Исследование показало типичное изменение интенсивности радиографического изображения в различных частях внутри металлической капсулы, имеющей различную толщину стенок. Эксперименты показали различие между материалом с макроскопическим сечением поглощения $13,9$ бн на молекулу вещества и алюминием, имеющим $1,62$ бн на одну молекулу. Существует проблема обнаружения веществ с близким макроскопическим сечением поглощения. Установлено, что при использовании нейтронного генератора можно установить различие между порошком мела и сахарозой, имеющими макроскопическое поперечное сечение $0,13$ см⁻¹ и $1,63$ см⁻¹.

Для исследования пиротехнических устройств используется и рентгеновская томография [45]. Изображения, полученные при заполнении устройства карбонатом кальция и эпоксидным компаундом, сильно отличаются от незаполненных образцов. Установлено, что радиографические и томографические рентгеновские изображения характеризуются хорошим контрастом. В работе продемонстрирована возможность использования рентгеновских томографических измерений в качестве аль-

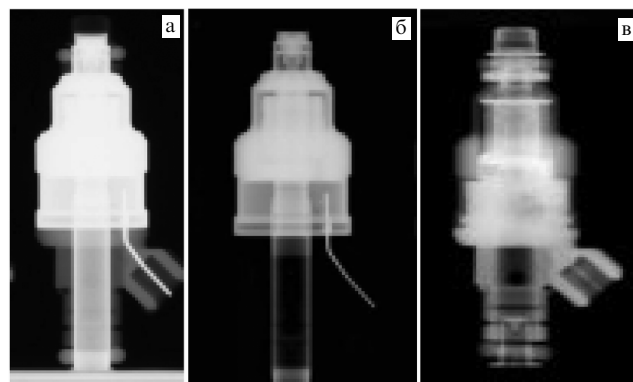


Рис. 12. Изображения топливных форсунок. Рентгеновские изображения при двух напряжениях на трубке 100 кэВ (а) и 190 кэВ (б). (в) Изображение в тепловых нейтронах [46].

тернативного средства исследования пиротехнических устройств в случае, когда нейтронная радиография не может быть выполнена по какой-либо причине.

2.3.3. Топливные форсунки. Неразрушающему контролю подвергаются и топливные форсунки. Изображения, полученные в рентгеновском излучении при напряжении на трубке 100 кэВ и 190 кэВ, а также в тепловых нейтронах, показаны на рис. 12 [46]. Видно, что нейтронные радиограммы выявляют в них больше деталей и в определённой степени дополняют рентгеновские изображения.

Микрокомпьютерная рентгеновская томография демонстрирует влияние внутренней геометрии топливной форсунки на характеристики потока в реальных условиях [47]. Фазово-контрастное изображение может быть использовано для исследования внутренней кавитации и движения иглы, входящей в данном случае в устройство топливной форсунки. Результаты исследования показывают, что на характеристики потока влияют движение и эксцентрические вибрации иглы. Рентгеновское изображение обеспечивает хорошее пространственное и временное разрешение. Многократные экспозиции и поглощение рентгеновского излучения позволяют получить распределение скорости и плотности в ближнем поле устройства.

Кавитационные явления в топливных форсунках были исследованы с помощью нейтронного и рентгеновского излучений. Изображения показали, что кавитация происходит в отверстии сопла [48–50]. Из рентгеновских измерений следует, что кавитационный объём имеет существенный градиент по объёму отверстия. Внутренняя структура кавитационного облака представляет собой полый шар, сформированный на входе в отверстие. Исследования позволили разработать модель геометрии отверстий сопла.

2.4. Динамическая радиография

Метод динамической нейтронной радиографии представляет собой неразрушающий контроль работы изделия в реальном режиме времени. Метод используется, когда неприменимы другие виды излучений. Примером является работающий двигатель внутреннего сгорания, действие которого можно наблюдать вследствие периодичности процесса и его синхрониза-

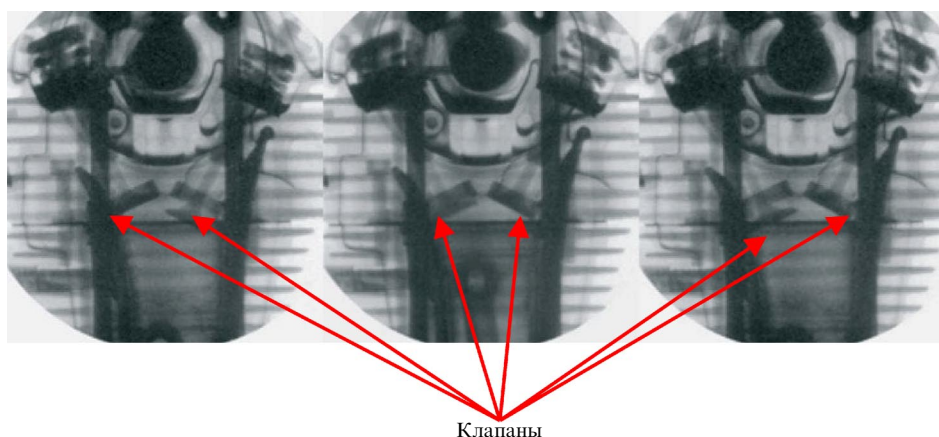


Рис. 13. Изучение работы двигателя внутреннего сгорания с помощью динамической нейтронной радиографии [51].

пии с работой нейтронной системы контроля [51]. На рисунке 13 следует обратить внимание на положение клапанов двигателя.

Нейтронные изображения горячей сигареты были исследованы в интересах производящей их компании [52]. Исследование позволило определить изменение массы сигареты в процессе её горения, а также осаждение, перемещение и испарение продуктов пиролиза. Дополнительно была определена скорость горения сигареты.

В современной ядерной энергетике вещество находится в условиях интенсивного энергетического воздействия. Это воздействие порождает целый комплекс сложных гидродинамических явлений, понимание которых представляет интерес как для прикладных, так и для фундаментальных задач. Радиографический метод с использованием рентгеновского излучения предоставляет новые возможности для экспериментального исследования широкого класса гидродинамических мало контрастных быстропотекающих явлений в плазме.

Рентгеновский метод, разработанный в работе [53], позволяет проводить исследования микрообъектов (в том числе биологических) с пространственным разрешением 10–20 мкм и временным разрешением 2–3 нс. Работа важна для понимания локальных динамических задач и является ключом к использованию различных коллективных явлений.

В работе [54] рентгеновская радиография применялась для исследования развития неустойчивости Рэлея – Тейлора и парных ударно-волновых структур в наносекундной лазерно-индуцированной плазме. Метод является усовершенствованием методики фазово-контрастной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения, которая открывает новые возможности для валидации и развития теоретических моделей, описывающих мало контрастные явления в лазерной плазме, где требуется субмикронная точность измерений.

В случае нейтронов исследования проводят на ядерных реакторах. При этом ухудшают степень коллимации пучка и, соответственно, пространственное разрешение в получаемых изображениях. В работе [55] нейтронная радиография и томография использовалась для понимания течения жидкости в породах и сорбции ими кадмия. Такое понимание необходимо для предсказания сейсмичности района, явления вытеснения загрязняющих веществ, приемлемости подземного хранения отходов, по-

требления геотермальной энергии и других вопросов. Использовалась различная чувствительность нейтронов к водородным изотопам.

Понимание потока жидкости в горных породах имеет решающее значение для количественной оценки многих природных процессов. До недавнего времени нейтронные методы недостаточно использовались в геологии из-за большого времени получения данных. В работе [55] демонстрируется возможность получения данных в случае просачивания жидкости и загрязняющих веществ в горных породах, в частности солей кадмия, которые содержатся во многих электронных устройствах, включая батареи, и являются распространённым загрязнителем почвы и подземных вод. Результаты исследования показывают, что в пористых породах сантиметрового масштаба перенос кадмия происходит по наиболее благоприятным путям. Нейтронная визуализация процесса даёт дополнительную информацию о подповерхностном переносе загрязняющих веществ.

Изучение биологических явлений связано с динамикой проникновения воды в корни растения. В работе [56] используется контраст для тепловых нейтронов, существующий для обычной и тяжёлой воды. Постепенное исчезновение изображения в корнях растения означает проникновение в них тяжёлой воды.

2.5. Исследование материалов

Нейтронная томография является одним из средств получения информации о пространственном распределении и диаметре гранитных включений в лампрофירהх (рис. 14) [57], которые представляют собой редкие, малообъёмные ультракалийные магматические породы,

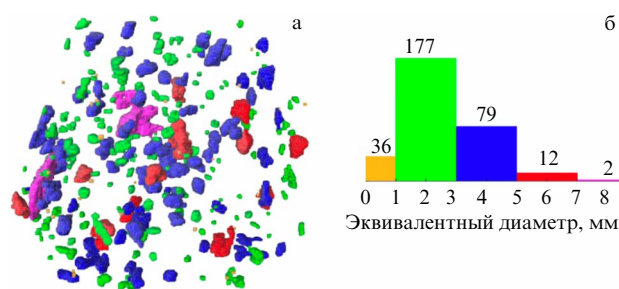


Рис. 14. Пространственное распределение (а) и диаметр (б) гранитных включений в образце лампрофירה [57].

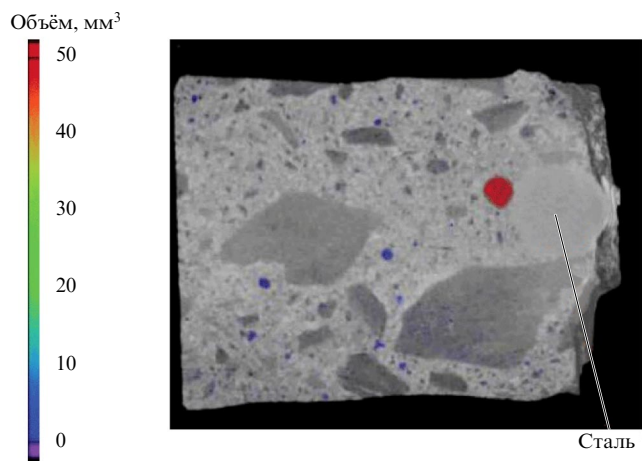


Рис. 15. Томограмма, используемая для анализа пористости бетона [58].

встречающиеся в основном в виде даек, лополитов, лакколлитов, штоков и небольших интрузий. Это щелочные недонасыщенные породы с высоким содержанием оксида магния, > 3 % оксида калия, высоким содержанием оксида натрия и высоким содержанием никеля и хрома.

В строительной практике важное значение имеет состав затвердевшего бетона и используемого раствора. Эти сведения требуются, в частности, в тех случаях, когда возникает необходимость установить, соответствовала ли дозировка составляющих, в первую очередь цемента, заданной марке бетона. Такая необходимость возникает, например, в случаях аварий или обнаружения недостаточной прочности бетона. Нейтронная радиография и томография, применяемые при определении состава затвердевшего бетона, представляют значительный интерес как для строительных организаций, непосредственно отвечающих за качество бетона, так и для органов контроля (арбитража и т.д.). Исследование затвердевшего бетона с помощью нейтронных изображений, является полезным инструментом изучения причин его растрескивания и появления дефектов (рис. 15) [58].

Часто реконструкция томограмм проводится программой Ocorpus [59], а для анализа пористости образца используется пакет VGStudio [60].

Вследствие большого сечения взаимодействия тепловых нейтронов с водородом нейтронная томография чувствительна к его содержанию и часто применяется для обнаружения водородосодержащих веществ и дополнения рентгеновских измерений. В качестве примера можно привести алюминиевую пену $AlSi_6Cu_4$, при производстве которой на первом этапе используется вспениватель в виде TiH_2 . Его распределение до и после процесса вспенивания имеет большое значение для всего процесса и определяет качество пены (рис. 16) [61].

Красным цветом (рис. 16б) в нейтронной томограмме обозначены агломераты TiH_2 . При исследовании распределения TiH_2 рентгеновская томография обеспечивает необходимое пространственное разрешение, в то время как нейтронная томография позволяет обнаруживать агломераты TiH_2 .

В [62] обсуждается необходимость применения нейтронной радиографии при исследовании диффузионных процессов и кинетики химических реакций. В качестве

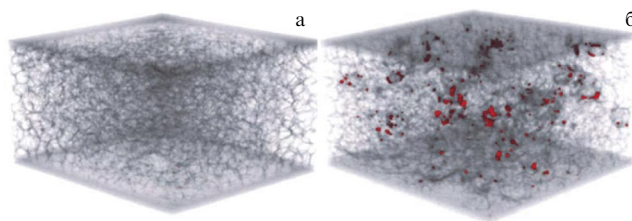


Рис. 16. Рентгеновская (а) и нейтронная (б) томограммы пены из $AlSi_6Cu_4$. Красным цветом в нейтронной томограмме обозначены агломераты TiH_2 [61].

примера используется циркониевый сплав, где исследуется диффузия водорода, его поглощение при высокотемпературном окислении, реакции, которые происходят в атмосфере азота и воздуха. Обсуждаются преимущества нейтронной радиографии.

С помощью нейтронного и рентгеновского излучения было исследовано поведение воды внутри стальной трубы [63]. Результаты выполненного в работе моделирования показывают возможность измерять плотность водорода при высоком давлении в металлических сосудах.

3. Обратное проектирование

Обратным проектированием называется процесс создания 3D-модели исследуемого изделия, создание конструкторской документации и самого изделия [64].

Обратное проектирование применяется в случае:

- отсутствия или восстановления конструкторской документации;
- несоответствия имеющейся документации;
- улучшения характеристик существующего изделия;
- разработки нового изделия.

До недавних пор считалось, что обратное проектирование требует длительного времени, больших затрат и имеет много ограничений. Однако появление усовершенствованных компьютерных инструментов для определения характеристик объекта, визуализации и программного обеспечения изменило эту точку зрения. Обычно данные для обратного проектирования изделий получают с помощью оптического или лазерного 3D-сканера, который даёт информацию о внешней геометрии изделия. Преимущество применения нейтронной томографии заключается в определении размеров внутренних структур без их физического разрушения в случае, когда образец содержит малококонтрастные или непроницаемые для рентгеновского излучения материалы.

Нейтронные томограммы обычно получают на реакторе, используя холодные, тепловые, эпитепловые и быстрые нейтроны. Полученный 3D-набор данных содержит информацию о локальном распределении коэффициента ослабления излучения в образце. Границы образца определяются по градиенту между соседними вокселями (элементами объёмного изображения, содержащими значение элемента). Данные конвертируются в геометрическую модель с помощью треугольной сетки, соединяющей соседние элементы и образующей набор треугольников, описывающих реальную поверхность. Эта процедура описывает также пустые области и неоднородности.

В работе [65] нейтронные томограммы были использованы для обратного проектирования составляющих газовой турбины. Естественно, что имеет значение расположение образца на вращающемся столе и время экспозиции. Восстановление структуры образца необходимо производить с помощью соответствующего программного обеспечения. Для неоднородных образцов целесообразно экспортировать и обрабатывать её составные части по отдельности.

Рентгеновское излучение используется, в частности, при обратном проектировании печатных плат [66].

4. Нейтронные генераторы в радиационной радиографии

Быстрые нейтроны применяются в случае необходимости получить изображение малопрозрачных для тепловых нейтронов изделий и содержащих слабоконтрастные для этих нейтронов вещества. Источником быстрых нейтронов являются ядерные реакторы, ускорители, нейтронные генераторы. Портативные нейтронные генераторы позволяют создавать оборудование, способное работать в лабораторных и полевых условиях. Перспективным направлением развития такого оборудования является использование генераторов, реализующих метод сопутствующих частиц (рис. 17) [67, 68]. Метод основан на использовании Эти генераторы излучают 14 МэВ нейтроны в результате ядерной реакции:



Альфа-частица вылетает совместно с нейтроном практически в противоположном направлении. Поэтому детектор альфа-частиц указывает направление вылета нейтрона. В качестве такого генератора может служить генератор ИНГ-27 производства Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова с выходом 14 МэВ нейтронов в стационарном режиме работы до 1×10^8 нейтронов/с [70] или генератор API 120 фирмы Thermo Scientific [71] с выходом 2×10^7 нейтронов/с.

В работе [71] была предложена мобильная система контроля багажа, основанная на использовании рентгеновского излучения и генератора быстрых нейтронов.

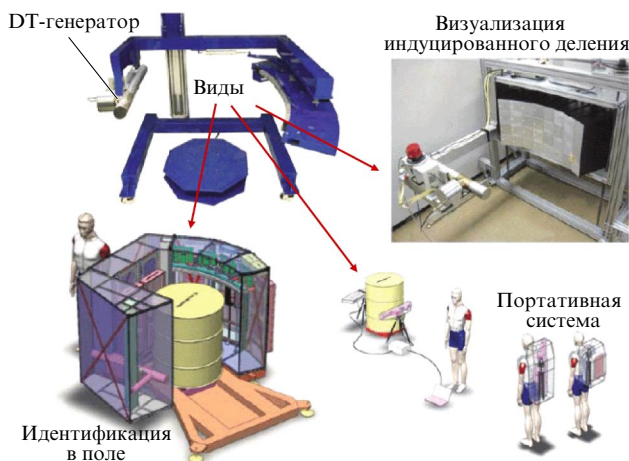


Рис. 17. Установка Ок-Риджской национальной лаборатории с нейтронным генератором, использующим метод сопутствующих частиц [69].

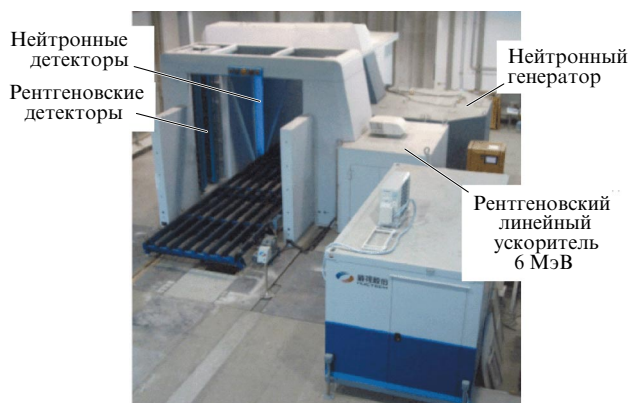


Рис. 18. Фото стереоскопической установки для досмотра багажа в двух видах излучений фирмы CSIRO (Австралия) и компании Nuctech Company Limited (Китай) [71].

Для инспектирования грузов система предусматривает использование туннеля размером 1,1 м, рентгеновского генератора с напряжением на трубке 170 кВ и DD-генератора 2,5 МэВ нейтронов (рис. 18). Источники рентгеновского и нейтронного излучений расположены внизу установки.

5. Заключение

В обзоре освещены основные применения радиационной радиографии и томографии в научных исследованиях и промышленности. Рассматриваемые методы обладают своими ограничениями, связанными с использованием ионизирующих излучений и необходимостью создания радиационной защиты. Рентгеновское и нейтронное излучения используются, прежде всего, для выявления дефектов, которые невозможно обнаружить невооруженным глазом. Они эффективны благодаря высокой проникающей способности излучений, различному механизму взаимодействия с веществом, отсутствию разрушения образца и достаточному для широкого круга промышленных задач пространственному разрешению. Излучения могут проходить через различные материалы, поэтому они пригодны для проверки объектов и материалов без необходимости перемещать последние. Методы в основном применяются для контроля изделий в ядерном топливном цикле, изучения поведения материалов в различных условиях, транспорта различных элементов в топливных батареях, а также в дефектоскопии различных изделий и в биологических исследованиях.

К исключённым из рассмотрения в настоящем обзоре вопросам относятся, в частности, способы радиационной радиографии и томографии в различных пучках и с использованием фазового контраста. В обзоре не рассматриваются экспериментальные установки, используемые для их реализации, и не поясняются преимущества совместного применения обоих видов излучений. Отбор материалов для обзора, тем не менее, представляется оправданным. Он знакомит с современным состоянием радиационной радиографии и томографии и полезен при знакомстве с радиационными методами исследования.

Существует значительное количество областей, где переход к цифровым методам приносит прибыль благо-

даря экономии времени и труда, исключения затрат на плёнку, химикаты и их утилизацию, увеличению эффективности производства. Сокращение времени измерений при этом обеспечивается автоматическим позиционированием изделий и сохранением полученных изображений за секунды.

Развитие методов цифровой радиографии и томографии в настоящее время связано, главным образом, с разработкой и совершенствованием методов исследования, источников и регистраторов излучений, с созданием высокоэффективных алгоритмов и программного обеспечения, а также автоматизацией измерений.

Список литературы

- Тюфяков Н Д, Штань А С *Основы нейтронной радиографии* (М.: Атомиздат, 1975)
- Гурвич А М *Физические основы радиационного контроля и диагностики* (М.: Энергоатомиздат, 1989)
- Kalender W *Computed Tomography: Assessment Criteria, CT System Technology, Clinical Applications* (Chichester: Wiley, 1986); Пер. на русск. яз.: Календер В *Компьютерная томография: основы, техника, качество изображений и области клинического использования* (Мир биологии и медицины, III, 03) (М.: Техносфера, 2006)
- Pizzutiello R J (Jr.), Cullinan J E *Introduction to Medical Radiographic Imaging* (Rochester, NY: Health Sciences Division, Eastman Kodak Co., 1996)
- Intern. Society for Neutron Radiography, <https://www.isnr.de>
- Рыбин И В "Радиографические методы", презентация, <https://thepresentation.ru/fizika/radiograficheskie-metody>
- Рихванов Л П, Замятина Ю Л, Архангельская Т А *Изв. Томского политехнического ун-та* **311** (1) 123 (2007)
- "Ядерное топливо: от руды до утилизации". Научно-деловой портал "Атомная энергия 2.0", <https://www.atomic-energy.ru/SMI/2017/03/15/73650>
- De Beer F C *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* **115** 913 (2015)
- Sebola P "Characterisation of uranium-mineral-bearing samples in the Vaal Reef of the Klerksdorp Goldfield, Witwatersrand basin", Master Science Thesis (Johannesburg: Faculty of Science, Univ. of the Witwatersrand, 2014); <http://hdl.handle.net/10539/16820>
- Кондратьева И А, Максимова И Г, Надъярных Г И *Литология и полезные ископаемые* (4) 387 (2004); Kondrat'eva I A, Maksimova I G, Nad'yarnykh G I *Lithology Mineral Resources* **39** 333 (2004)
- Johnson R H, Hall S M, Tigar A D *Geosciences* **11** 294 (2021)
- Chirilă C S, Ha T M H *Commun. Comput. Phys.* **21** 1475 (2017)
- Бушуев А В *Методы измерения ядерных материалов* (М.: МИФИ, 2007) Учебное пособие для студентов высших учебных заведений
- Бармаков Ю Н и др. *Ядерная физика и инжиниринг* **1** (1) 61 (2010)
- Tremsin A S et al. *J. Nucl. Mater.* **440** 633 (2013)
- Троянов В М и др. "Разработка новых видов топлива и конструкционных материалов для крупномасштабной ядерно-энергетической системы России (Россия, Москва, 26–27.05.2010)", <http://www.myshared.ru/slide/308297>
- Воробьев В В и др. *Датчики и системы* (2) 6 (1999)
- Parker H M O'D, Joyce M J *Prog. Nucl. Energy* **85** 297 (2015)
- Jenssen H K et al. *Prog. Nucl. Energy* **72** 55 (2014)
- Grosse M, Schillinger V, Kaestner A *Appl. Sci.* **11** 5775 (2021)
- Agrawal A et al. *J. Nucl. Mater.* **421** 47 (2012)
- Бобков Г О *Политехнический молодежный журн.* (07) 1 (2020) <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-7-629>
- Lehmann E H, Vontobel P, Hermann A *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **515** 745 (2003)
- Rai D K et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **879** 141 (2018)
- Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. Классификация радиоактивных отходов. Руководство по безопасности № GSG-1 (Вена: IAEA. Международное агентство по атомной энергии, 2014); <https://www.iaea.org/ru/publications/10534/klassifikaciya-radioaktivnyh-otvodov>
- De Beer F C, Strydom W J, Griesel E J *Appl. Radiat. Isotopes* **61** 617 (2004)
- De Beer F C, le Roux J J, Kearsley E P *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **542** 226 (2005)
- Дюсамбаев Д С и др. "Неразрушающие исследования внутренней структуры бетона разных марок" *Recent Contributions Phys.* (1(80)) 48 (2022) <https://doi.org/10.26577/rcph.2022.v80.i1.06>
- Кичанов С Е и др. *Письма в ЭЧАЯ* **17** 63 (2020); Kichanov S E et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* **17** 73 (2020)
- Gozani T *Active Nondestructive Assay of Nuclear Materials: Principles and Applications* (Washington, DC: The Commission. GPO Sales Program, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981)
- Singh M *Med. Phys.* **10** 421 (1983)
- Runkle R C, Chichester D L, Thompson S J *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **663** 75 (2012)
- Norman D R et al. "Active nuclear material detection and imaging", in *Proc. of the 2005 IEEE Nuclear Science Symp. Conf. Record, Fajardo, Puerto Rico, USA 23–29 October 2005* (Piscataway, NJ: IEEE, 2005) p. 1004, <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2005.1596423>
- Jones J L et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **562** 1085 (2006)
- Safeguards Techniques and Equipment* (Intern. Nuclear Verification Ser., 1020-6205, No.1, Rev. 2) 2011 ed. (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011); <https://www.iaea.org/publications/8695/safeguards-techniques-and-equipment>
- Ziesche R F et al. *Nat. Commun.* **13** 1616 (2022)
- Kardjilov N et al. *Materials Today* **14** (6) 248 (2011) [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70139-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70139-0)
- Banhart J et al. *Int. J. Mater. Res.* **101** 1069 (2010)
- Eifert L et al. *ChemSusChem* **13** 3154 (2020)
- Yu Y et al. *Appl. Sci.* **11** 6050 (2021)
- Bayon G *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **424** 92 (1999)
- Raghu N et al. *AIP Conf. Proc.* **989** 202 (2008)
- Namboodiri G N et al. *J. Nondestruct. Eval.* **39** 16 (2020)
- Namboodiri G N et al. *Eur. Phys. J. Plus* **136** 945 (2021)
- Imaging. Neutron and X-ray images produced in Phoenix's neutron imaging center, <https://www.phoenixneutronimaging.com/insights-and-updates/neutron-image-gallery>
- Wu Z et al. *Automot. Innov.* **2** 79 (2019)
- Takenaka N et al. "Application of neutron radiography for visualization of cavitation phenomena in a fuel injection nozzle of a diesel engine", in *Proc. of the 10th Intern. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS-2006, August 27–September 1, 2006, Kyoto, Japan* (Ed. H G Fujimoto) paper ID ICLASS06-174
- Mitroglou N et al. *Exp Fluids* **57** 175 (2016)
- Matusik K E et al. *Int. J. Engine Res.* **19** 963 (2018)
- Brunner J et al. "Dynamic neutron radiography of a combustion engine", in *16th World Conf. on Nondestructive Testing, NDT, August 30–September 3, 2004, Montreal, Canada* (Montreal, QC: Canadian Institute for ND, 2004); https://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/radiography/366_brunner.pdf
- Brenizer J S et al. *Beiträge Tabakforschung Int.* **17** (1) 3 (1996) <https://doi.org/10.2478/cttr-2013-0648>
- Жигалин А С и др. "Пространственные и временные характеристики излучения компактного рентгеновского радиографа на основе вакуумного дугового разряда", в сб. *Взаимодействие излучений с твердым телом, ВИТТ 2017, Материалы 12-й Международной конф., Минск, Беларусь, 19–22 сентября 2017 г.* (Отв. ред. В В Углов) (Минск: Изд. центр БГУ, 2017) с. 449; <https://elib.bsu.by/handle/123456789/182299>
- Макаров С С "Изучение экстремальных гидродинамических явлений в лазерной плазме методом когерентной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения", Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: Объединенный институт высоких температур РАН, 2022)
- Cordonnier B et al. *Front. Earth Sci.* **7** 306 (2019)

56. Tötzke C et al. *Sci. Rep.* **7** 6192 (2017)
57. Zel I et al. *J. Imaging* **8** (3) 80 (2022)
58. Garbe U et al. *Phys. Procedia* **88** 13 (2017)
59. Dierick M, Masschaele B, Van Hoorebeke L *Meas. Sci. Technol.* **15** 1366 (2004)
60. VGStudio MAX, <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgsm.html>
61. Solórzano E et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **324** 29 (2014)
62. Grosse M, Schillinger B, Kaestner A *Appl. Sci.* **11** 5775 (2021)
63. Wei T et al. *AIP Adv.* **12** 045220 (2022)
64. "Применение компьютерной томографии для обратного проектирования изделий", <https://sovtest-ndt.ru/reverseeng/>
65. Roos T H et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **651** 329 (2011)
66. Asadizanjani N et al. "Rapid non-destructive reverse engineering of printed circuit boards by high resolution X-ray tomography", <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27880.21765>
67. "Associated Particle Imaging (API)", Report DOE/NV/11718-223 (Santa Barbara, CA: Special Technologies Laboratory, 1998)
68. Chichester D L, Lemchak M, Simpson J D *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **241** 753 (2005)
69. Wellington T A et al. *Phys. Procedia* **66** 432 (2015)
70. "Нейтронные генераторы". Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Росатом, <http://vniia.ru/production/neitronnie-generatory/neitronnye-generatory.php>
71. Van Liew S *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **784** 417 (2015)

X-ray and neutron radiography and tomography in research and industry

A.Yu. Presnyakov^(1,a), V.I. Mikerov^(1,2,b), O.A. Gerasimchuk^(1,c), D.I. Yurkov^(1,2,d)

⁽¹⁾ *Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA), ul. Sushchevskaya 22, 127030 Moscow, Russian Federation*

⁽²⁾ *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),*

Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation

E-mail: ^(a) presnyakov_aleks@mail.ru, ^(b) vmikerov250846@yandex.ru, ^(c) oleg.gerasimchuk@bk.ru, ^(d) dmitry_yurkov@mail.ru

The state-of-the-art of the radiography and tomography using X-ray and neutron radiation is described. The methods are widely used in scientific research and industry due to the high penetrating power of radiation, different mechanisms of interaction with matter, the absence of sample destruction, and spatial resolution sufficient for a wide range of applications. Radiation methods are widely used in the nuclear fuel cycle, in studying the operation of fuel cells and materials under various conditions, in flaw detection, in biology, and in other fields of science and technology.

Keywords: X-ray radiation, neutron radiation, radiography, tomography, neutron generators

PACS numbers: 28.20.Pr, **61.05.–a**, 83.85.Hf

Bibliography — 71 references

Received 6 July 2023, revised 17 November 2023

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (6) 618–629 (2024)

Physics – Uspekhi **67** (6) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.11.039598>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.11.039598>