

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-54-69>



УДК 004.946

Подготовка специалистов по радиационному виду неразрушающего контроля с применением цифровых технологий

В. С. Кувшинников¹, Е. Е. Ковшов¹ ✉

¹ АО «НИКИМТ – Атомстрой»

Алтуфьевское шоссе, д. 43/2, г. Москва 127410, Российская Федерация

✉ e-mail: KovshovEE@atomrus.ru

Резюме

Целью исследования является разработка прикладного программного обеспечения, включая VR-технологии, для увеличения числа подготавливаемых специалистов по радиационному виду неразрушающего контроля за счет снижения удельной нагрузки на радиографические лаборатории при сохранении объемов практических занятий, приобретаемых компетенций и формируемых профессиональных навыков.

Методы. Рассмотрены основные факторы востребованности симулятора промышленной радиографии применительно к практической части образовательного цикла. Выделены наиболее значимые аспекты практической подготовки, доступные для их виртуальной реализации. Представлены результаты программной реализации математических моделей физических и физико-химических процессов ионизирующего излучения в контексте формирования цифрового двойника радиографического изображения.

Результаты. Выполнена практическая реализация дидактических материалов в виде программно-аппаратного VR-симулятора в составе цифровой образовательной среды для решения задач обучения, переподготовки, подготовки к аттестации персонала и предоставления допуска специалистов к выполнению работ по радиационному виду неразрушающего контроля на объектах. Исследованы физические и технологические аспекты, выполнены моделирование, алгоритмизация и программная реализация VR-симулятора. Результаты апробации учебных программ с интеграцией занятий в VR-симуляторе промышленной радиографии показали, что общее время практики обучающихся увеличивается на 30–65% при одновременном сокращении загруженности радиографической лаборатории более чем на 25%.

Заключение. Применение предложенного подхода позволит сократить экологические и медико-биологические риски за счет редуцирования требований к безопасности занятий с применением программно-аппаратного решения. Автоматизация процедур формирования тестовых заданий и контроля знаний на основе программных инструментальных средств и применения математических моделей, включая методы искусственного интеллекта, позволит достигнуть сокращения сроков обучения и поспособствует дальнейшему увеличению числа подготовленных специалистов по различным видам и методам неразрушающего контроля.

Практическая полезность разработки цифровой виртуальной среды раскрывается благодаря переносу и масштабированию полученного программно-аппаратного решения на другие виды и методы неразрушающего контроля согласно ГОСТ Р 56542-2019.

Ключевые слова: компьютерное обучение; виртуальная реальность; цифровые и информационные технологии; программный симулятор; рентгеновское изображение.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е. Подготовка специалистов по радиационному виду неразрушающего контроля с применением цифровых технологий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 54–69. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-54-69>.

Поступила в редакцию 16.10.2023

Подписана в печать 14.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Specialists Training for the Radiation Type of Non-Destructive Testing Based on Digital Technologies

Vladimir S. Kuvshinnikov¹, Evgeniy E. Kovshov¹✉

¹ JSC "NIKIMT – Atomstroy"

43/2 Altufevskoe highway, Moscow 127410, Russian Federation

✉ e-mail: KovshovEE@atomrus.ru

Abstract

The purpose of research is the development of application software, including VR-technologies, to increase the number of trained specialists in radiation type of nondestructive testing by reducing the per capita load on radiographic laboratories while maintaining the amount of practical training, acquired competencies and formed relevant professional skills.

Methods. Prerequisites for virtualization of the process of training specialists in nondestructive testing of structural materials and fabricated products are defined. The main factors of demand for industrial radiography simulator in relation to the practical part of the educational cycle on radiation type of nondestructive testing are considered. As a result of the analysis the most significant aspects of practical training, available for their virtual realization, are singled out. The results of software implementation of mathematical models of physical and physicochemical processes of ionizing radiation, attenuation and absorption of penetrating radiation within the scope of digital twin of radiographic image generation as a result of simulation of the technological process of radiation type of nondestructive testing are presented.

Results. Performed practical implementation of didactic materials in the form of hardware and software VR-simulator as part of digital educational environment to solve the problems of training, retraining, preparation for certification of personnel and providing admission of specialists to work on radiation type of nondestructive testing at facilities. Physical and technological aspects are analyzed, modeling, algorithmization and software implementation of VR-simulator are performed. A comprehensive approach to the creation of a learning environment with the use of digital technologies is presented. Considered are the main components, their goals and objectives. The structure of a practical lesson and illustrations of the training process in a virtual environment are given. The results of approbation of training programs with integration of classes in VR-simulator of industrial radiography have shown that the total time of practice of trainees increases by 40-55% with simultaneous reduction of per capita radiographic laboratory load by more than 25%. The main directions of development and scaling of software and hardware solution using VR-technologies are given.

Conclusion. The developed and tested hardware-software solution together with the results of scientific research suggests the possibility of application and development directions of the digital educational system with VR-environment. The proposed approach application will allow to reduce environmental and biomedical risks by reducing the requirements to safety of training with the use of software and hardware solution. Automation of testing task generation and knowledge control procedures on the basis of software tools and mathematical models application, including methods

of artificial intelligence, will allow to achieve training term reduction and will contribute to further increase in the number of trained specialists in various types and methods of nondestructive testing.

With the functional capabilities expansion and evolutionary development of hardware-software solution (industrial radiography simulator) on the basis of unified modular approach, software libraries and hardware-software interfaces, virtual simulator simplifies organization of the process of specialists training and knowledge control. Practical value of the digital virtual environment (VR-environment) development is revealed due to the transfer and scaling of the obtained hardware-software solution to other types and methods of nondestructive testing according to GOST R 56542-2019 "Non-destructive testing. Classification of types and method".

Keywords: computer training; virtual reality; digital and information technologies; software simulator; X-ray image.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuvshinnikov V. S., Kovshov E. E. Specialists Training for the Radiation Type of Non-Destructive Testing Based on Digital Technologies. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 54–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-54-69>.

Received 16.10.2023

Accepted 14.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Развитие отраслей промышленного производства связано с планомерным процессом усовершенствования известных методов контроля, а также с созданием и развитием новых видов и методов неразрушающего контроля, требующих инновационных подходов к обучению. В настоящее время вычислительная техника надёжно зарекомендовала себя как полезный и эффективный инструмент в образовании. Мировая практика наглядно демонстрирует, что на сегодняшний день применение информационных технологий весьма актуально в обучении персонала различным рабочим и инженерным профессиям [1; 2; 3]. Цифровые тренажёры на основе виртуальной реальности позволяют существенно расширить перечень решаемых при обучении задач и улучшить качество усвоения материала, задействуя зрительную, слуховую (аудиальную) и

двигательную (моторную) память. Таким образом очевиден потенциал применения VR-технологий в программах подготовки технических специалистов для специальностей, сопряженных с профессиональной опасностью и высокими требованиями к компетенциям и трудовым навыкам сотрудников.

Неразрушающий контроль (НК) играет важную роль в современном промышленном комплексе. В настоящее время технологии неразрушающего контроля активно модернизируются и обновляются в рамках концепции NDT 4.0 [4; 5; 6]. Совершенствование технического оснащения специалистов не может происходить отдельно от усовершенствований в программах их подготовки и переподготовки. В процессе исследований выявлен ряд недостатков широко распространённого аудиторного метода обучения НК [7].

В ходе обучения и контроля знаний, как правило, используются образцы, выполненные в металле, и физическое, действующее технологическое оборудование. При этом основной задачей является повышение эффективности обучения и контроля знаний обучающегося за счет сокращения материальных и временных затрат на весь цикл обучения, благодаря использованию в первую очередь цифровых образовательных ресурсов в виде подготовленных и загруженных в персональный ЭВМ дидактических материалов, цифровых двойников объектов контроля и технологического

оборудования для их неразрушающего контроля в VR-среде.

Радиационный контроль (РК) – один из самых распространённых видов неразрушающего контроля в сфере машиностроительного производства и энергетики [8]. В связи с этим в качестве приоритетного с точки зрения образования в VR-среде рассматривался радиационный вид неразрушающего контроля с радиографическим способом получения первичной информации как один из наиболее востребованных и широко применяемых в промышленности (рис. 1).

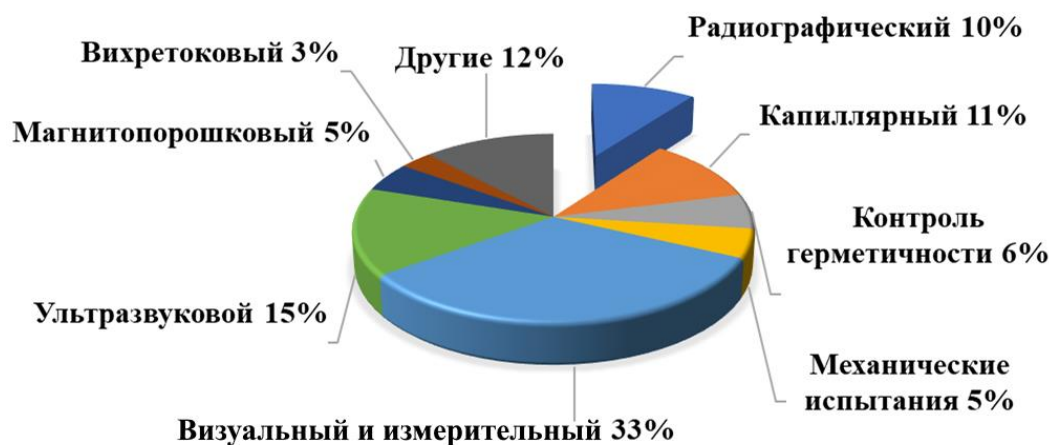


Рис. 1. Востребованность в аттестации по НК, РК и другим методам испытаний (2020 год)

Fig. 1. Demand for certification in NDT, RC and other testing methods (2020)

Немаловажно, что в отличие от методов визуального и измерительного, ультразвукового контроля радиографический метод, использующий ионизирующее излучение, несет больше угроз для здоровья человека и окружающей среды, что затрудняет увеличение практической составляющей образовательного процесса.

Материалы и методы

Одну из составных частей цифровой образовательной среды, предназначенной для обучения и повышения квалификации специалистов НК, составляет система управления обучением как функциональная часть цифровой образовательной среды [9]. Среди её задач – обеспечение учащихся и преподавателей возможностью удалённого доступа к

образовательным ресурсам и сервисам. Преподаватели также получают более удобный контроль за усвоением материала и успеваемостью обучаемых, эффективный инструмент для онлайн-семинаров и лекционных занятий. Платформа упрощает учёт результатов аудиторных и лабораторных занятий, включая практику в AR/VR-лабораториях. Согласно данным опроса, применение цифровых образовательных сред в задачах обучения стало на сегодняшний день объективной реальностью [10].

Планомерный перевод образовательного процесса на цифровой формат связан с трансформацией учебных планов и программ [11; 12; 13]. В ходе проведённого исследования сформулированы требования к переработке ряда методических и дидактических материалов. Для подготовки специалистов к аттестации по радиационному виду НК подготовлена новая образовательная программа, в которой из 10 практических занятий 7 включают работу в виртуальной среде тренажёра промышленной радиографии. Сегодня технологии виртуальной и дополненной реальности находят применение не только в части теории, но и в практике НК [14; 15]. Начиная со знакомства с технологией виртуальной реальности, обучаемым демонстрируются цифровые двойники объектов контроля и вспомогательного оборудования, предлагается возможность самостоятельного выполнения ряда специально разработанных тренировочных

заданий, закрепляющих теоретическую часть по мере прохождения всего курса подготовки.

Таким образом, с помощью VR-системы в виде симулятора решается задача проведения практических занятий в помещении, оборудованном системой виртуальной реальности (виртуальной лаборатории). При этом в полной мере могут быть оценены такие важные аспекты действий обучаемого, как: соблюдение корректной и безопасной последовательности работ при выполнении контроля; корректный выбор индикаторов и маркеров; правильный выбор схемы контроля объекта; корректное размещение и позиционирование как объекта контроля, так и источника рентгеновского излучения; соблюдение требований правил безопасности при работе с излучателями ионизирующего излучения; контроль соблюдения требований к срокам поверки оборудования и другие аспекты, влияющие на эффективность и безопасность труда, а также успешное прохождение аттестационных испытаний.

VR-симулятор направлен на предоставление доступной практики при переобучении специалистов согласно новым требованиям и стандартам нормативно-технической документации, например стандартам серии ISO [16; 17].

Практическое занятие в виртуальной лаборатории проходит в несколько этапов. Структура занятия отражена ниже (рис. 2).

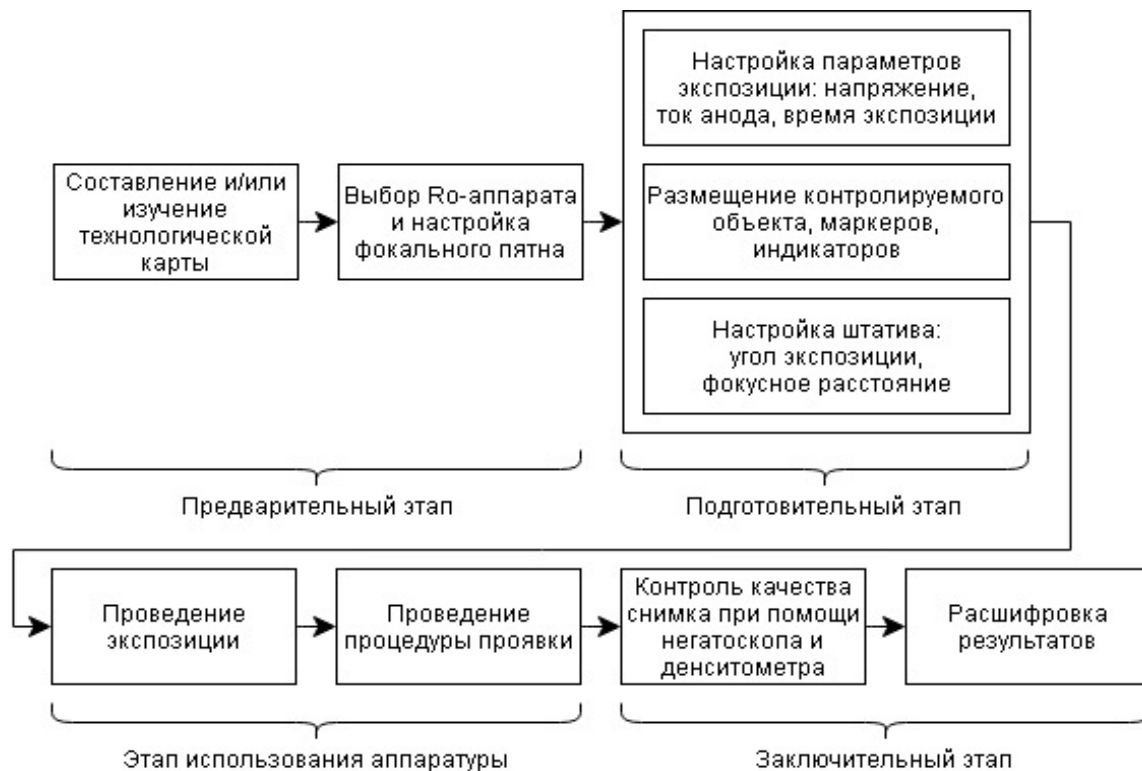


Рис. 2. Этапы практического занятия

Fig. 2. Practical session stages

На предварительном этапе составляется новая или изучается ранее разработанная маршрутно-операционная и/или технологическая карта, осуществляется выбор контролируемого образца, рентгеновского аппарата, схема контроля объекта (рис. 3).

Подготовительный этап включает определение таких параметров, как напряжение, ток анода и время экспозиции. Вручную (с использованием моторной памяти) проводится размещение виртуального объекта контроля, маркеров и индикаторов, настройка штатива рентгеновского аппарата (рис. 4).

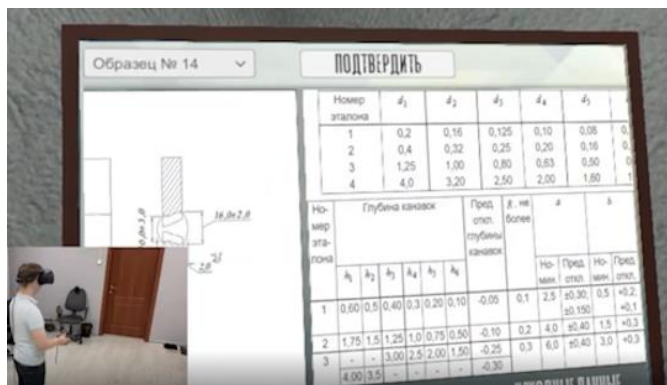


Рис. 3. Выбор контролируемого образца [7]

Fig. 3. Test sample selection [7]





Рис. 4. Элементы настройки экспозиции [7]

Fig. 4. Exposure adjustment elements [7]

В ходе подготовительного этапа обучаемый демонстрирует знания теории и практику работы с технической документацией по объекту контроля, рентгеновскому аппарату и детектору, умение выбрать сочетание параметров и рассчитать время экспозиции в соответствии со схемой контроля.

Далее проводится экспонирование с получением изображения на виртуальном детекторе, а в случае использования

фотопленки в качестве виртуального аналогового детектора требуется взаимодействие с виртуальной проявочной машиной. При этом контролируется режим химической обработки фотоматериала, проверяется неукоснительное соблюдение техники безопасности при работе с объектами повышенной опасности и травматизма [9]. Рассмотрим пример индикатора закрытия рентгенозащитной двери (рис. 5).



Рис. 5. Индикаторы соблюдения требований безопасности

Fig. 5. Indicators of safety compliance

На заключительном этапе оцениваются количественные и качественные характеристики полученного изображения с применением вспомогательного оборудования – негатоскопа и денситометра, выполняется расшифровка результатов рентгенограммы. При контроле качества

рентгенограммы особое внимание уделяется контрастности полученного изображения, показателям оптической плотности на участках расчётной контролируемой толщины образца, а также общей различающей способности полученного снимка (рис. 6).

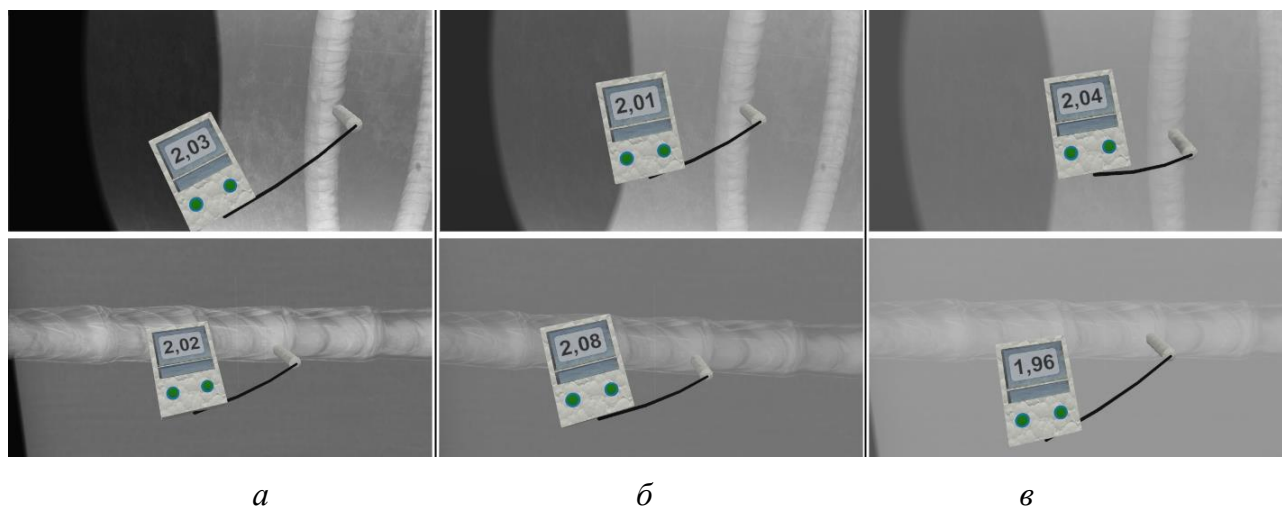


Рис. 6. Оценка оптической плотности участка смоделированных в VR-среде рентгенограмм с проволочными индикаторами чувствительности: а – рекомендуемое напряжение; б – нижний предел напряжения; в – верхний предел напряжения

Fig. 6. Area optical density estimation of VR-modeled radiographic images with wire quality indicators: а – recommended voltage; б – lower voltage limit; в – upper voltage limit

На рисунке 6 показано влияние настроек рентгеновского аппарата на качественные и количественные характеристики получаемого изображения, представлены образцы стыковых сварных соединений двух типов – плоские и кольцевые. Напряжение, анодный ток и время экспозиции устанавливаются в соответствии с номограммой и параметрами технологической карты аппарата.

Следует отметить, что для получения требуемых количественных и качественных характеристик рентгенограммы обучаемый выполняет расчет

параметров экспонирования в соответствии с нелинейными характеристиками детекторов, определяемыми в лабораторных условиях [18] и приводимыми в нормативной и технической документации. Ошибки в разработке технологической карты, выборе схемы контроля или в настройке параметров экспонирования проявляются на этапе контроля качества рентгенограммы. Для того чтобы обучаемый получил представление о последствиях наиболее распространённых ошибок, VR-симулятор оснащён функцией генерации реалистичных радиографических снимков (рис. 6–8).



Рис. 7. Схема взаимодействия цифровых двойников при симуляции РК

Fig. 7. Scheme of digital twin interaction during RC simulation

Формирование изображения производится на основе физически достоверных закономерностей средствами среды интерактивной машинной графики с использованием программ-шейдеров. В результате поэтапной обработки вершин

и фрагментов изображения производится оценка интенсивности прошедшего излучения по формуле

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \delta}, \quad (1)$$

где I , I_0 – выходная и начальная интенсивности рентгеновского излучения; e – число Непера; μ – линейный коэффициент ослабления материала; δ – толщина материала [9].

Ослабление интенсивности рентгеновских лучей в материале объекта контроля связано с несколькими процессами: с истинным поглощением фотонов (фотоэлектрический эффект), с рассеянием (когерентное и некогерентное) и с парным взаимодействием. Зависимость коэффициента ослабления от энергии частицы [19] описывается нелинейной немонотонной функцией (рис. 9).

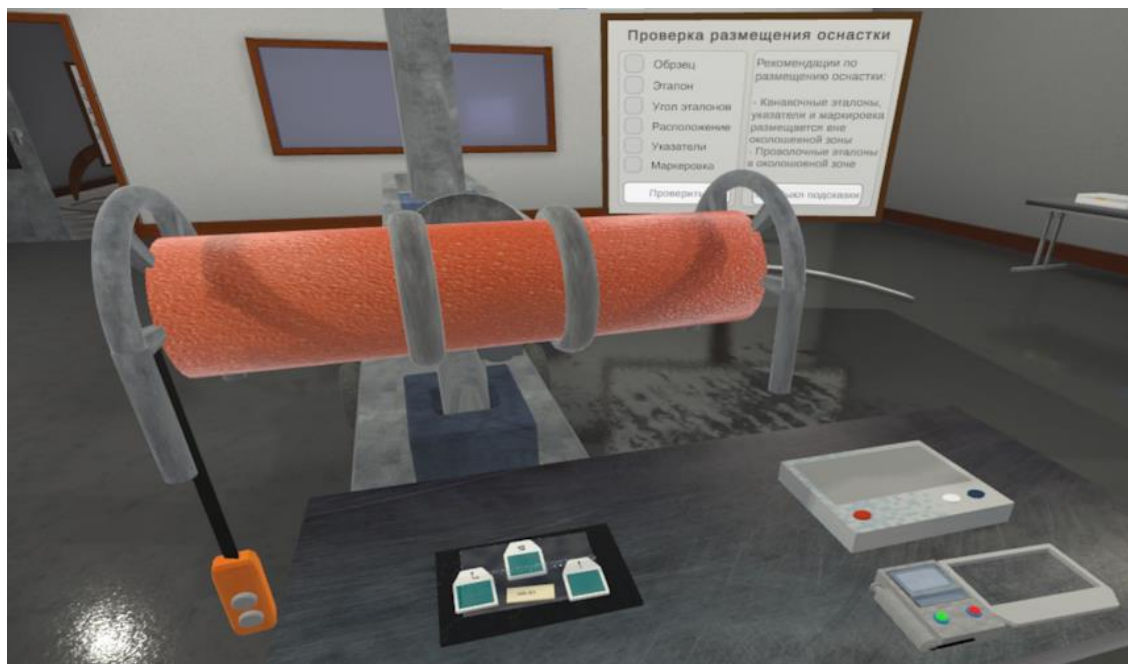


Рис. 8. Организация рабочего стола виртуальной лаборатории РК

Fig. 8. Virtual RC laboratory workbench design

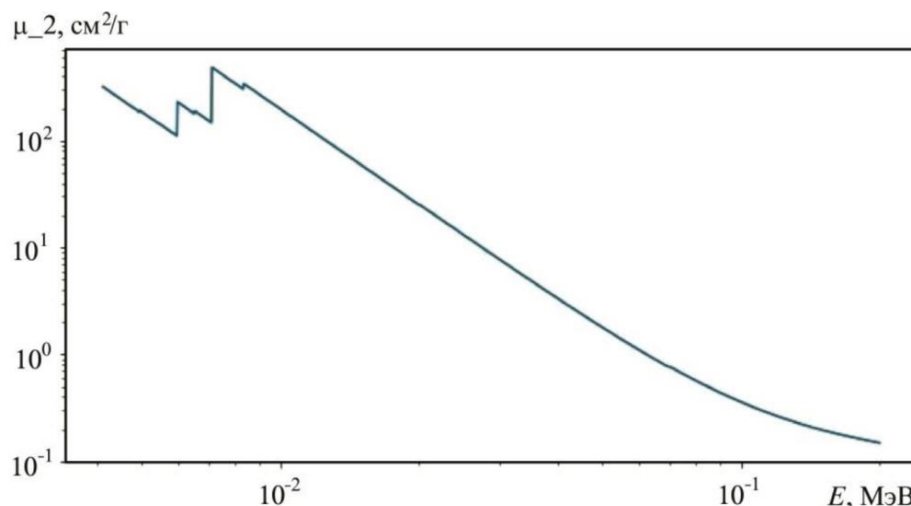


Рис. 9. Зависимость коэффициента массового ослабления от энергии частицы

Fig. 9. Mass attenuation coefficient dependence on particle energy

Линейный коэффициент ослабления выводится из массового коэффициента ослабления [20] по формуле

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления материала; ρ – плотность материала. Доза, поглощенная чувствительными зернами пленки или пикселями чувствительности матрицы цифрового плоскопанельного детектора, зависит от предварительно вычисляемой интенсивности действующего излучения:

$$E = I \cdot t \cdot \frac{F_N^2}{F^2}, \quad (3)$$

где t – продолжительность экспозиции; F_N – номинальное фокусное расстояние; F – фактическое фокусное расстояние [9].

По оценочной поглощённой дозе на участке носителя изображения определяется яркость для цифровых плоскопанельных детекторов или величина

полученной оптической плотности для аналоговых плёночных детекторов на основе зависимости

$$D = \frac{k}{1 + e^{-\lg(E) \cdot a}} + b, \quad (4)$$

где D – оптическая плотность; k – коэффициент поглощения плёнок; E – уточнённая экспозиция; a – коэффициент контрастности плёнки; b – коэффициент чувствительности плёнки [9].

Благодаря используемой образовательной технологии [21], обучаемым предоставляется реалистичный опыт проверки качества рентгенограмм, осуществляемый путем оценки различимости изображений проволоочных или канавочных индикаторов чувствительности, а также контрастности с применением цифровых двойников негатоскопа и денситометра.

Результаты и их обсуждение

Технологии цифровых двойников в настоящее время успешно развиваются

и находят свое применение на всех этапах жизненного цикла изделия от его конструкторско-технологического моделирования до производства и эксплуатации, включая его неразрушающий контроль и техническую диагностику.

Совокупность цифровых средств дистанционного и виртуального обучения позволяют сократить временные и материальные затраты на обучение и подготовку специалистов, значительно снизить радиационную опасность, в т. ч. на ранних этапах практических занятий, упростить организацию учебных и тренировочных лабораторий. Результаты апробации учебных программ с интеграцией занятий в VR-симуляторе радиографической лаборатории показали, что общее время практики обучающихся увеличивается на 30-65% при сокращении загруженности физической лаборатории более чем на 25%. Вышеперечисленное позволяет увеличить число обучаемых специалистов без материальных и временных затрат на оборудование и сертификацию дополнительных лабораторий, а также повысить средний уровень подготовки специалистов и обеспечить отрасли промышленности достаточным количеством подготовленных кадров в условиях наращивания объемов производства.

Выводы

Разработанное и протестированное программно-аппаратное решение в совокупности с результатами научных исследований позволяет судить о возможности

применения и направлениях развития цифровой образовательной системы с VR-средой. Применение предложенного подхода позволит сократить экологические и медико-биологические риски за счет редуцирования требований к безопасности занятий с применением программно-аппаратного решения. Автоматизация процедур формирования тестовых заданий и контроля знаний на основе программных инструментальных средств и применения математических моделей, включая методы искусственного интеллекта, позволит достигнуть сокращения сроков обучения и способствует дальнейшему увеличению числа подготовленных специалистов по различным видам и методам неразрушающего контроля.

При расширении функциональных возможностей и эволюционного развития программно-аппаратного решения (симулятора промышленной радиографии) на основе применения унифицированного модульного подхода, использования программных библиотек и программно-аппаратных интерфейсов виртуальный симулятор упрощает организацию процесса подготовки специалистов и контроля знаний. Практическая полезность разработки цифровой виртуальной среды (VR-среды) раскрывается благодаря переносу и масштабированию полученного программно-аппаратного решения на другие виды и методы неразрушающего контроля согласно ГОСТ Р 56542-2019 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов».

Список литературы

1. Brown K. Innovation in the Learning Management System (LMS): Design Elements for Retail Industry Training // Research Anthology on Business and Technical Education in the Information Era. IGI Global, 2021. P. 375–402. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5345-9.ch021>.
2. E-learning for a Boring Process at an Aerospace Industry Company / D. Dindana, F. Muhammad, A. Kurniawati, M. T. Kurniawan // 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). Bangkok, Thailand: IEEE, 2020. P. 256–260. <https://doi.org/10.1109/ICIEA49774.2020.9101929>.
3. E-learning and industry 4.0: A chatbot for training employees / F. Clarizia, M. De Santo, M. Lombardi, D. Santaniello // Proceedings of Fifth International Congress on Information and Communication Technology. 2021. N 1184. P. 445–453. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5859-7_44.
4. Saboonchi H., Blanchette D., Hayes K. Advancements in radiographic evaluation through the migration into NDE 4.0 // Journal of nondestructive evaluation. 2021. Vol. 40, N 17. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00749-x>.
5. NDE 4.0: Progress, promise, and its role to industry 4.0 / N. Meyendorf, N. Ida, R. Singh, J. Vrana // NDT & E International. 2023. Vol. 140, no. 8. P. 102957. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102957>.
6. Trampus P. Symbiosis of industry 4.0 and non-destructive evaluation. Buletin Stiintific. Kishinev, 2023. P. 43–51.
7. Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С., Казаков Д. Ф. Формирование рентгеновского изображения объекта неразрушающего контроля в среде виртуальной реальности // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 8 (278). С. 22. <https://doi.org/10.14489/td.2021.08.pp.014-022>.
8. Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review / M. Gupta, M. A. Khan, R. Butola, R. M. Singari // Advances in Materials and Processing Technologies. 2022. Vol. 8, N 2. P. 2286–2307. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1909332>.
9. Салихова В. К. Современные LMS-платформы дистанционного обучения // E. Global Congress. 2023. N 3. P. 13–18.
10. Radchikova N. P., Odintsova M. A., Sorokova M. G. The attitude of Russian university teachers towards the digital educational environment // RUDN Journal of Psychology and Pedagogics. 2023. Vol. 20, N 2. P. 311–330. <https://doi.org/10.22363/2313-1683-2023-20-2-311-330>.
11. Легкова И. А., Кропотова Н. А. Особенности дистанционного обучения: риски и перспективы // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны.

Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 211–215.

12. Гераськина А. С., Кушунина А. И. Изменения цифровых навыков, особенности и эффективность дистанционного образования // Научно-методические основы формирования функциональной грамотности: теория и практика современной школы: сборник лучших докладов Всероссийской с международным участием научно-практической конференции. Коломна: Государственный социально-гуманитарный университет, 2023. С. 176–182.

13. Разработка и реализация интеллектуальных составляющих цифровой образовательной среды / С. В. Крашенинников, Д. А. Курносков, М. А. Нахатович, Ф. А. Новиков // Современные тенденции инженерного образования: сборник трудов конференции. СПб.: Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, 2023. С. 178–183.

14. Aerial Nondestructive Testing and Evaluation (aNDT&E) / G. Chen, L. Li, H. Zhang, Z. Shi, B. Shang // Materials Evaluation. 2023. Vol. 81, N 1. P. 67–73. <https://doi.org/10.32548/2023.me-04300>.

15. The InVizAR project: Augmented reality visualization for non-destructive testing data from jacket platforms / C. Boletsis, A. Lie, O. Prillard, K. Husby, J. Li // 18th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications Conference (VISIGRAPP). Trondheim, Norwegian: SINTEF Digital, 2023. P. 114.

16. Косарина Е. И., Михайлова Н. А., Демидов А. А. Сравнение отечественных и зарубежных нормативных документов по радиографическому контролю. Преимущества и недостатки // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 5. С. 39–48.

17. Макаров А. В. Некоторые особенности использования ГОСТ 7512-82 и ГОСТ ISO 17636-1 при контроле трубопроводов // В мире неразрушающего контроля. 2019. Т. 22, № 1. С. 22–24.

18. Сенситометр для построения характеристических кривых радиографических пленок и определения чувствительности к излучению и градиента в соответствии с требованиями ISO 11699-1: 2008 / А. А. Демидов, Е. И. Косарина, Н. В. Коурова, Н. А. Михайлова // Труды ВИАМ. 2020. Т. 6-7, № 89. С. 81–90.

19. XCOM. URL: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (дата обращения: 11.09.2023).

20. Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С. Симуляция физических свойств материала объекта контроля в VR-тренажере промышленной радиографии // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 2(296). С. 4–12. <https://doi.org/10.14489/td.2023.02.pp.004-012>.

21. Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С., Казаков Д. Ф. Применение моделей цифровых двойников при формировании радиографического изображения в среде

виртуальной реальности // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 9. С. 4–15. <https://doi.org/10.14489/td.2023.09.pp.004-015>.

References

1. Brown K. Innovation in the Learning Management System (LMS): Design Elements for Retail Industry Training. Research Anthology on Business and Technical Education in the Information Era. IGI Global, 2021, pp. 375–402. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5345-9.ch021>

2. Dindana D., Muhammad F., Kurniawati A., Kurniawan M. T. E-learning for a Boring Process at an Aerospace Industry Company. 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). Bangkok, Thailand: IEEE, pp. 256–260. <https://doi.org/10.1109/ICIEA49774.2020.9101929>

3. Clarizia F., De Santo M., Lombardi M., Santaniello D. E-learning and industry 4.0: A chatbot for training employees. *Proceedings of Fifth International Congress on Information and Communication Technology*, 2021, no. 1184, pp. 445–453. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5859-7_44

4. Saboonchi H., Blanchette D., Hayes K. Advancements in radiographic evaluation through the migration into NDE 4.0. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2021, vol. 40, no. 17, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00749-x>

5. Meyendorf N., Ida N., Singh R., Vrana J. NDE 4.0: Progress, promise, and its role to industry 4.0. *NDT & E International*, 2023, vol. 140, no. 8, pp. 102957. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102957>

6. Trampus P. Symbiosis of industry 4.0 and non-destructive evaluation. *Buletin Stiintific. Kishinev*, 2023, pp. 43–51.

7. Kovshov E. E., Kuvshinnikov V. S., Kazakov D. F. Formirovanie rentgenovskogo izobrazheniya ob"ekta nerazrushayushchego kontrolya v srede virtual'noj real'nosti [Radiographic image of a non-destructive testing object generation in a virtual reality environment]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2021, vol. 24, no. 8(278), pp. 14–22. <https://doi.org/10.14489/td.2021.08.pp.014-022>

8. Gupta M., Khan M. A., Butola R., Singari R. M. Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022, vol. 8, no. 2, pp. 2286–2307. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1909332>

9. Salihova V. K. Sovremennye LMS-platformy distancionnogo obucheniya [Modern LMS distance learning platforms]. *E. Global Congress*, 2023, no. 3, pp. 13–18.

10. Radchikova N. P., Odintsova M. A., Sorokova M. G. The attitude of Russian university teachers towards the digital educational environment. *RUDN Journal of Psychology and Pedagogics*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 311–330. <https://doi.org/10.22363/2313-1683-2023-20-2-311-330>

11. Legkova I. A., Kropotova N. A. [Features of distance learning: risks and prospects]. *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya inzhenernykh sistem obespecheniya pozharnoj*

bezopasnosti ob"ektov. Sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu obrazovaniya grazhdanskoj oborony [Topical issues of improving engineering systems for ensuring fire safety of facilities. A collection of materials of the IX All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the formation of civil defense]. Ivanovo, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters Publ., 2022, pp. 211–215. (In Russ.)

12. Geraskina A. S., Kushunina A. I. [Changes in digital skills, features and effectiveness of distance education]. *Nauchno-metodicheskie osnovy formirovaniya funktsional'noj gramotnosti: teoriya i praktika sovremennoj shkoly. Sbornik luchshih dokladov vserossijskoj s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskaya konferencii* [Scientific and methodological foundations of the formation of functional literacy: theory and practice of modern schools. A collection of the best reports of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Kolomna, State University of Social Sciences and Humanities Publ., 2023, pp. 176–182. (In Russ.)

13. Krashenninnikov S. V., Kurnosov D. A., Nakhatovich M. A., Novikov F. A. [Development and implementation of intellectual components of the digital educational environment]. *Sovremennye tendentsii inzhenerenogo obrazovaniya. Sbornik trudov konferencii* [Modern trends in engineering education. Proceedings of the conference]. St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny Publ., 2023, pp. 178–183. (In Russ.)

14. Chen G., Li L., Zhang H., Shi Z., Shang B. Aerial Nondestructive Testing and Evaluation (aNDT&E). *Materials Evaluation*. 2023, vol. 81, no. 1, pp. 67–73. <https://doi.org/10.32548/2023.me-04300>

15. Boletsis C., Lie A., Prillard O., Husby K., Li J. The InVizAR project: Augmented reality visualization for non-destructive testing data from jacket platforms. 18th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications Conference (VISIGRAPP). Trondheim, Norwegian, SINTEF Digital, 2023, p. 114.

16. Kosarina E. I., Mikhailova N. A., Demidov A. A. Sravnenie otechestvennyh i zarubezhnyh normativnyh dokumentov po radiograficheskomu kontrolyu. Preimushchestva i nedostatki [Comparison of domestic and foreign standard documents for radiographic control. Advantages and disadvantages]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik = All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2021, no. 5, pp. 39–48.

17. Makarov A. V. Nekotorye osobennosti ispol'zovaniya GOST 7512-82 i GOST ISO 17636-1 pri kontrole truboprovodov [Some features of use of GOST 7512-82 and GOST ISO 17636-1 at pipeline inspection]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya = In the World of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 22–24.

18. Demidov A. A., Kosarina E. I., Kourova N. V., Mikhailova N. A. Sensitometr dlya postroeniya harakteristicheskikh krivykh radiograficheskikh plenok i opredeleniya chuvstvitel'nosti k izlucheniyu i gradienta v sootvetstvii s trebovaniyami ISO 11699-1: 2008

[Sensitometer for construction of characteristic curves of radiographic films and determination of sensitivity to radiation and gradient in accordance with the requirements of ISO 11699-1: 2008]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2020, vol. 6-7, no. 89, pp. 81–90.

19. XCOM. Available at: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. (accessed 11.09.2023)

20. Kovshov E. E., Kuvshinnikov V. S. Simulyaciya fizicheskikh svoystv materiala ob"ekta kontrolya v VR-trenazhere promyshlennoj radiografii [Testing object's material physical properties simulation in the industrial radiography VR environment]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2023, vol. 26, no. 2(296), pp. 4–12. <https://doi.org/10.14489/td.2023.02.pp.004-012>

21. Kovshov E. E., Kuvshinnikov V. S., Kazakov D. F. Primenenie modelej cifrovyyh dvojnikov pri formirovanii radiograficheskogo izobrazheniya v srede virtual'noj real'nosti [The use of digital twins models while a radiographic image formation in a virtual reality environment]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2023, vol. 26, no. 9. pp. 4–15. <https://doi.org/10.14489/td.2023.09.pp.004-015>

Информация об авторах / Information about the Authors

Кувшинников Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-инженерной и образовательной лаборатории цифровых компьютерных систем и автоматизации НИКИМТ, АО «НИКИМТ – Атомстрой», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: KuvshinnikovVS@atomrus.ru, ORCID: 0000-0002-2565-2510

Vladimir S. Kuvshinnikov, Can. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Scientific Engineering and Educational Laboratory of Digital Computer Systems and Automation NIKIMT, JSC "NIKIMT – Atomstroy", Moscow, Russian Federation, e-mail: KuvshinnikovVS@atomrus.ru, ORCID: 0000-0002-2565-2510

Ковшов Евгений Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, начальник Научно-инженерной и образовательной лаборатории цифровых компьютерных систем и автоматизации НИКИМТ, АО «НИКИМТ – Атомстрой», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: KovshovEE@atomrus.ru, Researcher ID: B-1077-2016, ORCID: 0000-0003-4758-1730

Evgeny E. Kovshov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Laboratory of the Scientific Engineering and Educational Laboratory of Digital Computer Systems and Automation NIKIMT, JSC "NIKIMT – Atomstroy", Moscow, Russian Federation, e-mail: KovshovEE@atomrus.ru, Researcher ID: B-1077-2016, ORCID: 0000-0003-4758-1730