

# Визуализация участка сборки и контроля ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300 с использованием технологий виртуальной реальности

А.О. Толоконский<sup>1</sup>, Д.Г. Ковалёнок<sup>2</sup>

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>1</sup> ORCID: 0009-0006-7800-4660 , [toloconne@yandex.ru](mailto:toloconne@yandex.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1449-8263 , [faith.science.denis.kovalionok@gmail.com](mailto:faith.science.denis.kovalionok@gmail.com)

## Аннотация

В настоящее время для подготовки специалистов в области ядерной энергетики используются технологии виртуальной реальности, которые позволяют обучаемому непосредственно окунуться в среду своей деятельности, произвести обучение максимально приближенное к реальным условиям, при этом не причинив вреда своему здоровью. Для того чтобы изготовить тепловыделяющую сборку (ТВС) необходимо на этапе производства пройти ряд установок контроля, подтверждающих качество и безопасность. Авторами была предложена разработка виртуального тренажера с установками контроля ТВС для РУ БРЕСТ-ОД-300 такими как: отмывка и сушка ТВС, контроль герметичности ТВС, контроль поверхностной загрязненности ТВС, контроль массы и входимости ТВС в стапель, контроль геометрии ТВС.

Данный тренажер разрабатывался в среде Unity с использованием очков виртуальной реальности Oculus. Результаты визуализации участка контроля позволяют производить проверку внешнего вида ТВС на наличие дефектов и повреждений, измерения массы и длины ТВС, а также проверку на герметичность, отсутствия утечек и загрязненности.

**Ключевые слова:** обучающие тренажеры, трехмерное моделирование, графические объекты, тепловыделяющая сборка, визуальное представление.

## Введение

В настоящее время с развитием информационных технологий стремительно набирает свою популярность виртуальная реальность – удивительная технология, которая предвещает радикально изменить взаимодействие людей с информацией.

Под виртуальной реальностью понимается моделирование 3-х мерной среды, при взаимодействии с которой человек воспринимает ее как реальную, что вызывает ощущение присутствия в ней. Данный эффект достигается благодаря специальному оборудованию: очки или шлем виртуальной реальности за счет своей конструкции дают стереоскопическое 3D-изображение смоделированного мира, датчики движения вычисляют перемещение в реальном мире и преобразуют их в виртуальный мир. Кроме того, в комплект оборудования могут входить контроллеры, которые отслеживают движение рук человека и переносят их в виртуальный мир, благодаря чему можно брать виртуальные предметы, бросать их или осуществлять иные действия, связанные с использованием рук [1].

На ранних этапах своего развития виртуальная реальность использовалась в большей степени в игровой индустрии, однако в настоящий момент ее применение интенсивно растет и в других областях. Сейчас технологии виртуальной реальности активно

применяются в проектировании, строительстве, различных тренажёрах и симуляторах, медицине и в других областях человеческой деятельности [2,3].

Также наблюдается процесс внедрения VR-технологий в атомную промышленность, что позволит снизить ошибки в проектировании, повысит качество подготовки специалистов, облегчит проверку различных сценариев технологического процесса.

В виртуальном мире могут быть смоделированы аварийные ситуации, которые нельзя воспроизвести в реальной жизни и благодаря этому специалист, ранее ознакомленный с теоретическим материалом, получает опыт, приближенный к реальному [4].

Немаловажную роль в процессе обучения специалистов в области ядерной энергетики занимает подготовка, которая предполагает погружение в профессиональную среду с целью получения необходимых навыков. Для этого используются различные тренажерные системы, которые направлены на создание условий работы, схожими с реальными для закрепления теоретических знаний. Тренажеры визуализируют происходящие технологические операции, позволяют рассмотреть различные ситуации, благодаря чему нарабатываются навыки по выбору оптимальных действий в каждом из случаев. Внедрение технологий виртуальной реальности в подобные тренажеры повысит качество обучения специалистов.

В данной работе осуществлялась интеграция VR-технологий в обучающий тренажер по управлению технологическим процессом линии компоновки ТВС.

## **Общие сведения о аналитическом 3D тренажере и тренажере виртуальной реальности (VR)**

В настоящее время при подготовке специалистов в атомной отрасли используются различные системы обучения в виде полномасштабных или аналитических тренажеров.

Полномасштабный тренажер – это как правило цифровой двойник ядерной энергетической установки. Он обеспечивает моделирование всех режимов эксплуатации в реальном масштабе: режимов нормальной эксплуатации, проектных аварийных режимов и запроектных аварий.

Аналитический тренажер – это тренажер, информационное и моторное поля которого представлены на экранах дисплеев, а управление оборудованием осуществляется с помощью «мыши» или экранных сенсоров.

Во время проведения занятий на приведенных выше тренажерах вывод определенных динамических параметров осуществляется в графической форме, как правило на экран или файл для печати.

Тренажер с применением технологий виртуальной реальности отличается от вышеупомянутых тем, что сотрудники при обучении погружаются в полноценную копию рабочего места и отрабатывают все регламентные действия до автоматизма, что позволяет повысить уровень их осознанности при работе на реальном оборудовании и снизить риски возникновения инцидентов и аварийных ситуаций. Такие тренажеры позволяют симулировать ситуации, которые могут возникнуть на практике, при этом не связывая обучающихся с какими-либо рисками или ограничениями [5].

Таким образом внедрение виртуальных тренажеров актуально в настоящее время. Это может стать полезным инструментом в образовательном процессе и позволит значительно улучшить его качество и эффективность, а также сэкономить время и ресурсы в условиях быстро меняющегося мира [6].

Тренажер по сборке и контролю ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300 с использованием технологий виртуальной реальности разработан так, как показано на рисунке 1. Когда обучающийся надевает очки виртуальной реальности, запускается приложение в Unity на графическом сервере для формирования виртуального пространства.

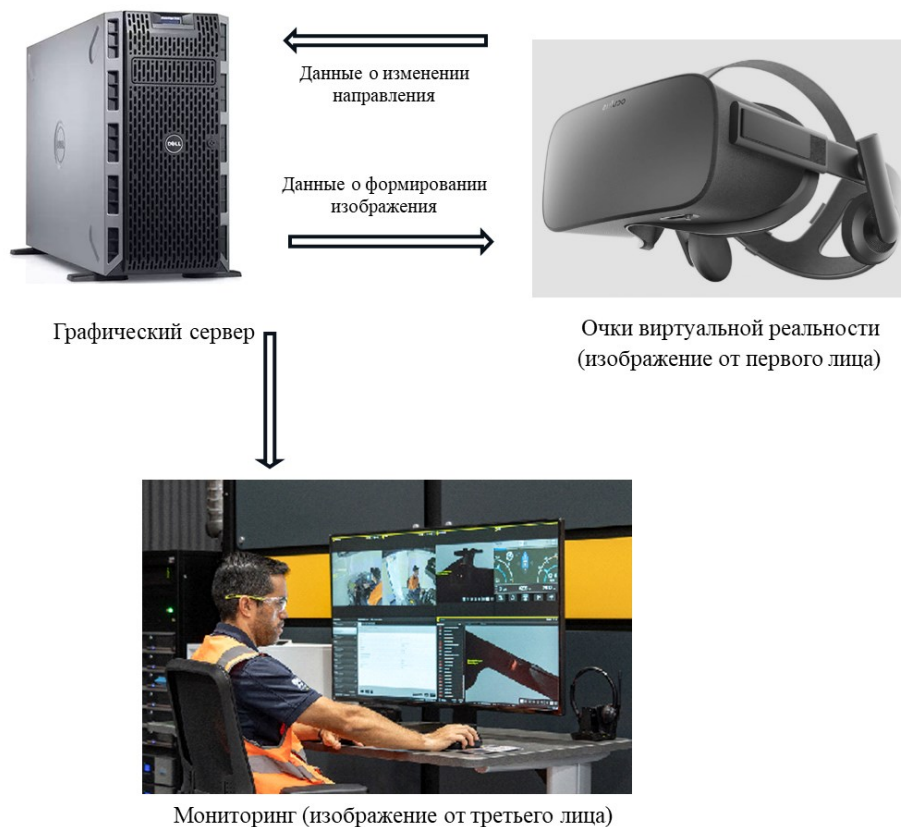


Рис.1. Концепция работы тренажера с использованием виртуальной реальности

Графический сервер предоставляет информацию о формировании 3D пространства от первого лица для очков виртуальной реальности, а также отправляет данные на мониторинг, отображая местоположение и поведение персонажа в виртуальной среде. Благодаря этому инженер-инструктор может следить за выполняемыми действиями оператора и задавать необходимые сценарии.

## Процесс сборки и контроля ТВС

ТВС (тепловыделяющие сборки) представляют собой структурные элементы внутри ядерного реактора, содержащие ядерное топливо и служащие для управления ядерными реакциями и выделением тепла. Процесс сборки и контроля ТВС включает несколько этапов:

*Изготовление компонентов.* Изготовление ТВС обычно включает в себя производство топливных стержней, которые содержат ядерное топливо (например, уран-235) и оболочку для предотвращения утечек радиоактивных материалов. В этом процесс также включается изготовление структурных компонентов ТВС, таких как держатели стержней, защитные оболочки и другие необходимые элементы.

*Сборка ТВС.* Топливные стержни укладываются в определенном порядке внутри каркаса. Структурные элементы закрепляются так, чтобы обеспечивалась надежность и целостность ТВС.

*Контроль качества и безопасности.* Этот процесс включает в себя визуальные проверки на предмет дефектов, трещин или других повреждений компонентов ТВС. Измерение размеров и геометрических параметров, чтобы ТВС соответствовала требованиям проекта. Проведение тестов и анализа материалов для стандартизации и обеспечении нормам безопасности. Проверка уровней радиации и обеспечение отсутствия утечек из ТВС.

*Тестирование перед эксплуатацией.* Проверка прочности и устойчивости ТВС под действием нагрузок и вибраций. Моделирование условий тепловыделения в реакторе для проверки эффективности охлаждения и управления тепловыделением.

*Упаковка и транспортировка.* Защита ТВС от повреждений при транспортировке и хранении. Подготовка всех необходимых документов и сертификатов качества для сопровождения ТВС.

Весь процесс сборки и контроля ТВС тщательно регулируется и подвергается многочисленным проверкам для обеспечения безопасности и эффективности ядерного реактора.

## **Средство разработки приложения виртуальной реальности Unity**

Unity – один из самых популярных игровых движков, с помощью которого создаются разнообразные игровые приложения на различных платформах. Для начинающих разработчиков предоставляется бесплатная версия. В Unity можно разрабатывать как 2D, так и 3D проекты [7].

Unity относительно низкие системные требования, что является очевидным преимуществом, так как многие начинающие разработчики не располагают превосходными параметрами системы. Кроме того, сам движок и проекты на нём не занимают много места на диске, что заставляет обратить на себя внимание, особенно когда на компьютере память занята другими важными приложениями [8].

Для написания скриптов используется язык C#, что даёт выигрышную позицию, так как начинающему пользователю значительно проще писать на этом языке [9].

С точки зрения количества игровых ресурсов, называемых ассетами, Unity занимает лидирующую позицию, в магазине Unity можно найти огромное разнообразие готовой анимации, 3D-моделей, текстур, аудио и многого другого. Во встроенном магазине доступно более 50 000 таких ресурсов, многие из которых бесплатные [11].

## **Шлем виртуальной реальности**

Используемое в настоящей работе оборудование представлено очками виртуальной реальности Oculus Rift S и двумя контроллерами Oculus touch (по одному на каждую руку) (см. рис. 2). Данные очки обладают отличной светоизоляцией, хорошим углом обзора и являются достаточно удобными в использовании за счёт комфортного распределения веса. Контроллеры отслеживают движение рук и пальцев, с хорошей точностью передавая все жесты в виртуальный мир, что позволяет брать предметы внутри этого мира, кидать их, нажимать на кнопки и многое другое [12].

Важным достоинством оборудования Oculus Rift S, отличающей её от других моделей, является наличие функционала Oculus Passthrough+, который отвечает за безопасность пользователя [13]. Она работает следующим образом: когда пользователь покидает настроенную ранее игровую зону, картинка, отображаемая на дисплее очков, переключается на реальный мир в черно-белом цвете, чтобы пользователь мог видеть окружающий мир и избежать соударения с препятствиями. Пользователь не сможет продолжить играть, пока не вернётся в игровую зону.

Итак, оборудование Oculus Rift S имеет отличное соотношение цены и качества и является оптимальным выбором, который соответствует требованиям и условиям настоящей работы.



Рис.2. Оборудование Oculus Rift S

## **Установка крепления головок на каркасе ТВС**

Работа установки осуществляется следующим образом. Головка ТВС, головка привода замка, гайки и развальцовка подаются на плите установки шлюза с транспортером в зону работы робота установки. Кантователь переводит каркас ТВС, закрепленный в ложементе-свидетеле в вертикальное положение (см. рис. 3). Робот щупом механизма закручивания и захвата определяет координаты расположения труб на каркасе. Захватом механизма закручивания и захвата фиксируется головка ТВС на плите установки шлюза с транспортером, поднимается вертикально, при этом датчик силомоментный, установленный на механизме закручивания и захвата, взвешивает головку ТВС, тем самым определяется наличие головки ТВС в механизме закручивания и захвата. Головка ТВС устанавливается на трубы каркаса ТВС, поджимается и фиксируется захватом. После чего захват механизма закручивания и захвата разжимается и перемещается за гайкой на плиту установки шлюза с транспортером. Фиксатором механизма закручивания и захвата захватывается гайка на плите шлюза с транспортером и перемещается роботом, для определения наличия гайки, на кронштейн с датчиком. Определяется наличие гайки. Гайка перемещается на каркас ТВС, закручивается на трубу. Гайка считается закрученной, если количество оборотов гайки попадет в интервал от 10 до 12 оборотов и момент закручивания превышает 1 Н/м. Если количество оборотов менее 10 и при этом крутящий момент на механизме закручивания гаек превышает 1 Н/м, то гайка считается незакрученной. В этом случае гайка выкручивается механизмом закручивания гаек. Далее оператор принимает решение о повторном закручивании, либо отправляет ТВС на разборку. Закручиваются оставшиеся гайки. После закручивания гаек робот установки механизмом закручивания и захвата захватывает развальцовку с плиты установки шлюза с транспортером и проверяет наличие развальцовки на кронштейне с датчиком. После определения наличия развальцовки робот установки развальцовывает трубы каркаса ТВС, раскатывая кромки труб. Контроль развальцовки труб производит оператор при помощи трех устройств видеонаблюдения, расположенных вокруг головки ТВС. Робот установки механизмом закручивания и захвата фиксирует головку привода замка и определяет наличие головки привода замка силомоментным датчиком. Головка привода замка подается ориентированно внутрь головки ТВС, поворачивается внутри головки ТВС на 30° и удерживается. Кантователь при помощи пневмоцилиндра, перемещает тяги привода замка. Тяги входят в отверстия головки привода замка и фиксируют её. Оператор при помощи видеокамер, контролирует фиксацию головки привода замка. После фиксации головки привода замка робот возвращается в исходное положение. Координатный не копирующий манипуля-



тор захватывает ТВС за головку, захваты ложементов разжимаются, ТВС перемещается КМ на следующую технологическую позицию. Кантователь перемещает ложемент в горизонтальное положение для транспортировки его на следующую технологическую позицию [1].

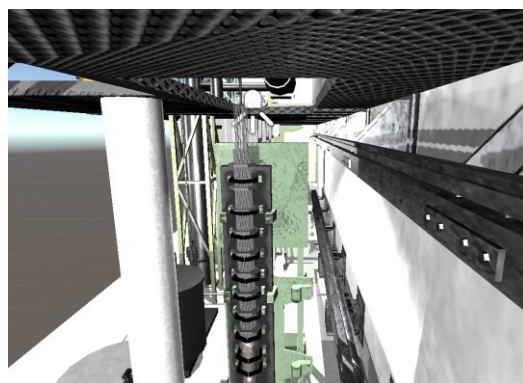
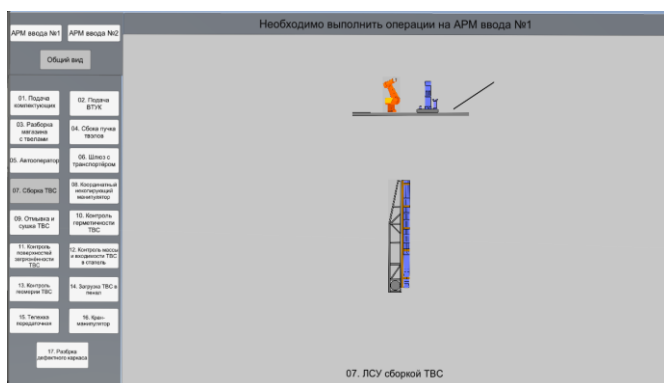


Рис. 3. Мнемосхема и 3D визуализация участка сборки ТВС

## Установка отмычки и сушки ТВС

Реторта предназначена для размещения в ней ТВС во время промывки и сушки. В состав установки входят: реторта, устройство подачи воды, устройство подготовки воздуха, барботер, сливное устройство, устройство сушки, биологическая защита (см. рис. 4). Устройство подачи воды предназначено для заполнения дистиллированной водой. Устройство подготовки воздуха предназначено для подготовки и подачи воздуха на барботер. Сливное устройство предназначено для слива воды из реторты в специальную емкость. Устройство сушки предназначено для нагрева воздуха и обдува ТВС. Биологическая защита предназначена для защиты ремонтного персонала от облучения ТВС при проведении им ремонтных работ в случае зависания ТВС внутри установки.

От кантователя ТВС транспортируется КМ в реторту установки отмычки и сушки ТВС. Отмычка ТВС производится дистиллированной водой (при температуре от 20 до 30 °С) за два цикла, включающих заполнение реторты водой, промывку ТВС с барботажем и слив воды. Время отмычки в одном цикле не менее 30 мин.

Сбор промывочной воды осуществляется в приемные емкости. Из приемных емкостей промывочная вода насосами передается на переработку в другое здание.

Сушка ТВС осуществляется в реторте обдувом ТВС горячим воздухом (при температуре от 100 до 120 °С). Время сушки не менее 40 мин [16].

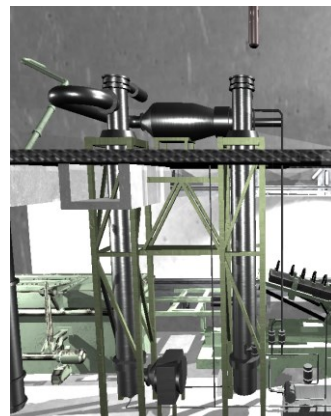
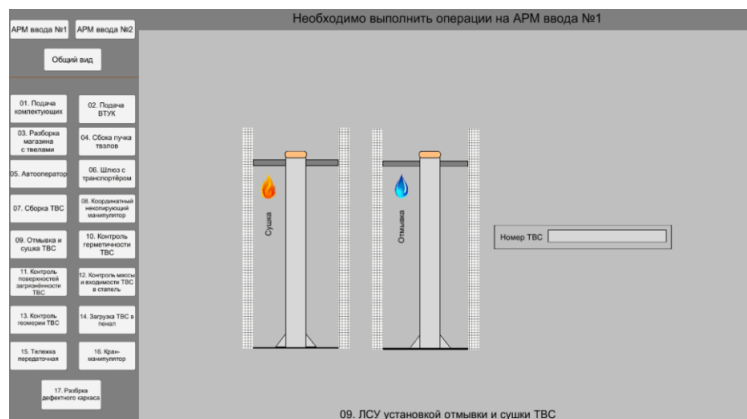


Рис. 4. Мнемосхема и 3D визуализация установки отмычки и сушки ТВС

## Установка контроля герметичности ТВС

После включения ЛСУ автоматически запустится течеискатель и выполнит проверку и настройку порога чувствительности по внутренней калиброванной течи (определение порога чувствительности течеискателя, далее - ПЧТ), а также проводится калибровка течеискателя (см. рис. 5). Значение ПЧТ определяется автоматически и выводится на панель управления течеискателем (для продолжения работ ПЧТ должен быть не более  $7 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>Па/с). В случае превышения ПЧТ допустимого значения необходимо провести повторную проверку и настройку порога чувствительности течеискателя, а также повторную калибровку течеискателя). В случае превышения ПЧТ допустимого значения после проведения 2-х циклов проверки и настройки порога чувствительности по внутренней контрольной течи работы приостановить до устранения причин отрицательного результата проверки.

Открыть пневматический актуатор реторты и продуть реторту азотом не менее 5 минут. После истечения времени продувки закрыть актуатор.

Произвести проверку порога чувствительности системы (ПЧС) системы по внешней калиброванной течи. ПЧС должен быть не более  $2,5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>Па/с. В случае превышения полученного значения ПЧС над допустимым (система управления установкой выдаст сообщение о неудовлетворительном результате ПЧС) повторно провести определение ПЧС по внешней калиброванной течи. Провести повторное вакуумирование системы. Допустимое количество повторений проверки ПЧС по внешней контрольной течи - два. В случае превышения ПЧС допустимого значения после повторных проверок работы приостановить до устранения причин отрицательного результата проверки ПЧС.

ТВС доставляется на установку КМ, который перемещает её и останавливается над ретортой. При достижении заданных координат позиционирования КМ производится открытие пневматического актуатора реторты включается подача азота. Привод каретки КМ включается на опускание. При совмещении маркировки ТВС с устройством считывания производится останов ТВС для считывания её номера. Далее опускание ТВС продолжается до полного вхождения её в реторту.

Привод каретки КМ останавливается, производится расцепление захвата КМ от головки ТВС и перемещение его от реторты. Необходимым условием отсоединения захвата КМ от головки ТВС является срабатывание датчика наличия изделия, подтверждающее полное вхождение ТВС в реторту. Актуатор закрывается. Подача азота прекращается при помощи форвакуумного насоса производится откачка реторты до давления менее 6 Па. Давление в реторте контролируется по вакуумному датчику. После достижения заданной величины вакуума течеискатель переходит в режим контроля течи и подключается к реторте. Производится операция контроля герметичности ТВС. Если полученное значение течи менее допустимого потока утечки гелия (ТВС герметична), то для проверки работоспособности установки к реторте подключается течь гелиевая калиброванная (гелит). Течеискатель должен показать соответствующее значение течи. После отключения гелита от реторты значение течи должно вернуться к фоновому потоку от герметичной (годной) ТВС. Если полученное значение течи при контроле ТВС более или равно допустимого порога утечки гелия, то ТВС признается негерметичной и забраковывается. Перед извлечением ТВС производится напуск азота в реторту. Напуск производится через трубопровод, подключённый в нижней части реторты. Захват КМ ориентируется по оси реторты. При достижении заданных координат позиционирования КМ производится открытие вакуумной задвижки. Захват КМ опускается и состыковывается с головкой ТВС. При помощи КМ ТВС выгружается из реторты и подаётся на последующую позицию участка сборки и контроля ТВС. Вакуумная задвижка закрывается. Прекращается подача азота [17].

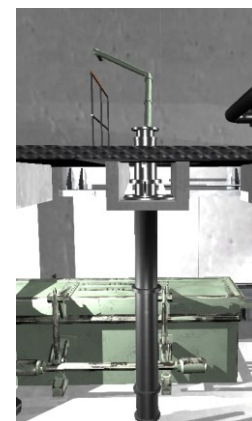
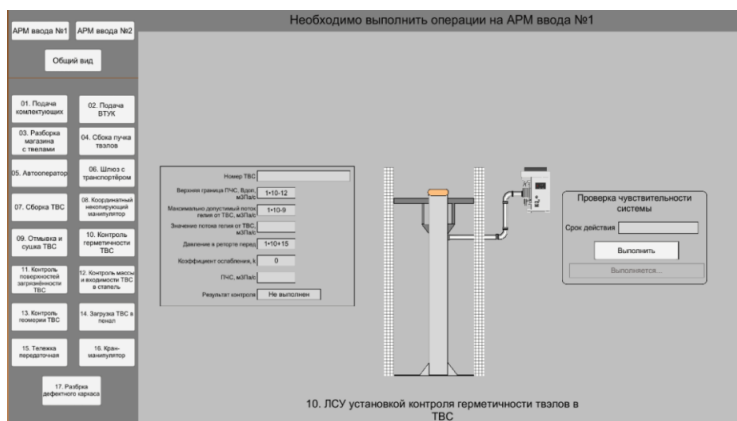


Рис. 5. Мнемосхема и 3D визуализация установки контроля герметичности ТВС

## Установка контроля поверхностной загрязненности ТВС

Установка контроля поверхностной загрязненности ТВС предназначена для контроля загрязненности поверхности ТВС методом мазка (см. рис. 6). В состав установки входят: реторта, блок отбора проб, устройство считывания маркировки ТВС, биологическая защита реторты.

ТВС с помощью КМ опускается в реторту через блок отбора проб, в котором производится отбор мазка. Отбор проб осуществляется с поверхности периферийных твэлов при опускании ТВС на пониженной скорости. Извлечение сменного картриджа из блока отбора проб производится после удаления ТВС из реторты. Извлеченный из обоймы картридж упаковывается в пластиковый пакет, после чего направляется в лабораторию для подготовки счетных образцов и последующих измерений.

Численные значения дозиметрических характеристик поверхности загрязнения ТВС заносятся в паспорт ТВС.

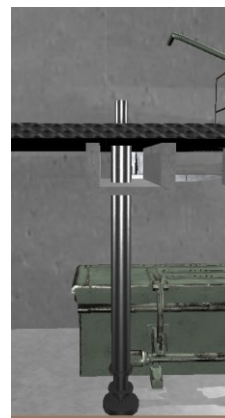
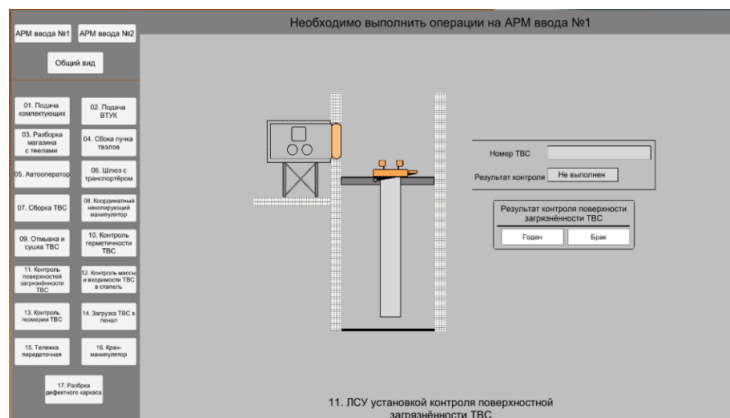


Рис. 6. Мнемосхема и 3D визуализация установки контроля поверхностной загрязненности ТВС

## Установка контроля массы ТВС, контроля входимости ТВС в стапель, работоспособности механизма управления хвостовиком, перемещения РО СУЗ (для ТВС с РО СУЗ)

ТВС доставляется на установку КМ, который перемещает её с установки контроля поверхностной загрязненности и останавливается над стапелем (см. рис. 7). При достижении заданных координат позиционирования КМ весоизмерительное устройство



производит измерение массы ТВС. Если масса ТВС находится в пределах допустимых значений массы для данного типа ТВС, то производится включение привода каретки КМ на опускание, которое выполняется до совмещения маркировки ТВС с устройством считывания. Привод каретки КМ останавливается, производится считывание и передача полученного номера ТВС на верхний уровень АСУТП, после чего опускание ТВС продолжается до полного вхождения ее в стапель. До начала опускания захват КМ открывает замок хвостовика, перемещая привод замка в нижнее положение. Цикл контроля входимости ТВС в стапель включает в себя последовательно выполняемые операции: подъем каретки КМ до полного извлечения ТВС из стапеля, поворот захвата КМ на  $60^\circ$ , опускание и последующий подъем ТВС, поворот захвата КМ на  $60^\circ$  и повторение опускания/подъема ТВС; возврат (поворот) захвата КМ в исходное положение, опускание каретки КМ до полного вхождения ТВС в стапель. Останов привода каретки КМ и переключение его с опускания на подъем производится по обнулению показаний весоизмерительного устройства, при этом полное вхождение ТВС в стапель подтверждается срабатыванием датчика наличия ТВС в стапеле. В ходе перемещения ТВС в стапеле выполняется постоянный контроль величины изменения фактического веса ТВС (по текущим показаниям весоизмерительного устройства) с передачей результатов контроля на верхний уровень АСУТП. На АРМ управления линией результаты контроля могут отображаться как в виде текущих показаний весоизмерительного устройства, так и в виде максимальных значений изменения веса ТВС при каждом опускании/подъеме. Если все полученные значения отклонения веса ТВС не выходят за пределы допустимых значений, производится контроль работоспособности замка хвостовика. Захват КМ закрывает замок хвостовика, перемещая привод замка в верхнее положение. Результат контроля определяется по совместному срабатыванию датчика контроля перемещения привода и хотя бы одного из датчиков контроля цанги замка. Для ТВС с РО СУЗ предусмотрено проведение операций контроля проходимости канала ТВС. Для проведения данного контроля производится расцепление захватного устройства КМ от головки ТВС и перемещение его от стапеля, при этом необходимым условием отсоединения захватного устройства КМ от головки ТВС является срабатывание датчика наличия ТВС.

Цикл контроля проходимости канала ТВС включает в себя последовательно выполняемые операции: включение привода и перемещение траверсы узла контроля РО СУЗ к стапелю, включение привода захватного устройства РО СУЗ на опускание до упора в головку РО СУЗ, что подтверждается датчиком подвода захвата к РО СУЗ, включение привода захвата и поворот его на  $90^\circ$  по часовой стрелке (сцепление захвата с головкой РО СУЗ), включение привода захватного устройства РО СУЗ на подъем верхнего положения с последующим переключением его на опускание РО СУЗ в нижнее положение. В ходе перемещения РО СУЗ в канале ТВС выполняется постоянный контроль величины изменения веса РО СУЗ (по текущим показаниям весоизмерительного устройства) с передачей результатов контроля на верхний уровень АСУТП. Далее на установке осуществляется: включение привода захвата и поворот его на  $90^\circ$  против часовой стрелки (отсоединение захвата РО СУЗ от головки РО СУЗ), включение привода захватного устройства РО СУЗ на подъем до исходного положения, включение привода и возврат траверсы в исходное положение (от стапеля), позиционирование КМ над стапелем и сцепление захвата КМ с ТВС. Если полученные значения массы ТВС и отклонения веса ТВС и РО СУЗ находятся в пределах допустимых значений и подтверждена работоспособность замка хвостовика, то ТВС признается годной и результаты контроля заносятся в базу данных АСУТП в виде отчета. По завершению всех циклов контроля, предусмотренных для данного типа ТВС, КМ открывает замок хвостовика, извлекает ТВС из стапеля и перемещает ее на установку контроля геометрии и внешнего вида.

При выходе полученных значений массы ТВС, отклонения веса ТВС или РО СУЗ за пределы допустимых значений контроль будет продолжен до завершения текущих операций соответствующего цикла (до извлечения ТВС из стапеля), после чего цикл

контроля прерывается и результаты контроля заносятся в базу данных АСУТП с соответствующим признаком брака. Если при контроле замка хвостовика не сработал датчик контроля перемещения привода или ни один из датчиков контроля цанги замка, то захватное устройство КМ открывает замок хвостовика и каретка КМ включается на подъем до полного извлечения ТВС из стапеля и результаты контроля заносятся в базу данных АСУТП с соответствующим признаком брака. Все вышеуказанные операции с ТВС, признанной бракованной по какому-либо параметру, выполняются без выхода из режима «Автоматизированный». В случае прерывания контроля КМ открывает замок хвостовика, извлекает ТВС из стапеля и перемещает ее на участок запеналивания [19].

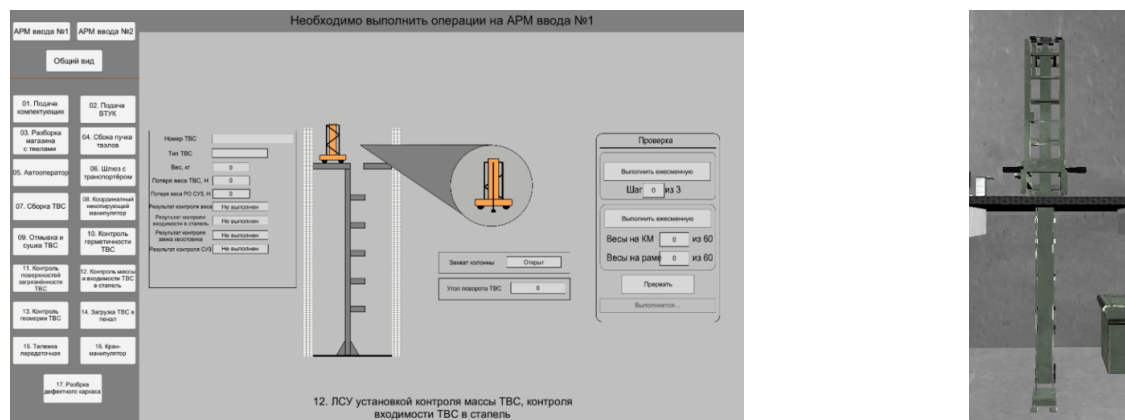


Рис. 7. Мнемосхема и 3D визуализация установки контроля массы ТВС, контроля входимости ТВС в стапель

## Установка контроля геометрии и внешнего вида ТВС

При достижении КМ заданных координат позиционирования захватное устройство КМ открывает замок хвостовика, перемещая привод замка в нижнее положение, после чего производится включение привода каретки КМ на опускание, которое выполняется до совмещения маркировки ТВС с устройством считывания (см. рис. 8). Привод каретки КМ останавливается, производится считывание маркировки и передача номера ТВС на верхний уровень АСУТП линии сборки ТВС. Далее опускание ТВС продолжается до полного вхождения ее в реторту (до посадки на опорную поверхность центратора), при этом срабатывает датчик конечного положения ТВС. После срабатывания датчика конечного положения ТВС КМ производит закрывание замка хвостовика, отсоединение захватного устройства и вывод его из головки ТВС и из зоны действия верхнего датчика устройства измерения длины (верхнего оптического микрометра). После этого производится измерение длины ТВС двумя оптическими микрометрами, расположенными на известном расстоянии друг от друга (определенном заранее по имитатору ТВС). Верхний оптический микрометр фиксирует положение верхней кромки головки ТВС, нижний микрометр используется для определения положения нижней кромки накопника ТВС. Результат измерения передается в верхний уровень АСУТП линии сборки ТВС.

Далее производится опускание захватного устройства КМ, сцепление его с головкой ТВС, подъем ТВС из реторты. КМ перемещает ТВС вверх до совпадения середины нижней дистанцирующей решетки с плоскостью, в которой производится измерение размера «под ключ» и прекращает опускание. Производится сканирование двух противоположных граней обода дистанцирующей решетки с лазерными датчиками по линиям перпендикулярным оси ТВС. По результатам сканирования профиля граней обода дистанцирующей решетки и расстоянию между датчиками, заранее определенному по имитатору ТВС, производится расчет размера «под ключ» и сохранение результата. КМ опускает ТВС для измерения средней дистанцирующей решетки и производится измерение размера «под ключ», затем операции повторяются для контроля верхней ди-

станцирующей решетки. По окончании контроля верхней дистанцирующей решетки ТВС опускается до тех пор, пока верхняя кромка головки ТВС не окажется в зоне контроля устройства контроля внешнего вида, затем происходит переключение режима «Автоматизированный» в раздел «Контроль внешнего вида».

После этого оператор АРМ управления линией (контролер) дает разрешение на подъем ТВС и производит визуальный контроль внешнего вида при помощи видеокамер устройства контроля внешнего вида путем сравнения с внешним видом контрольного образца. При контроле внешнего вида имеется возможность останавливать подъем, производить опускание ТВС и изменять масштаб изображения. По окончании контроля внешнего вида контролер вводит результат контроля, при этом закрывается раздел «Контроль внешнего вида», и установка переводится в режим «Автоматизированный».

КМ поворачивает ТВС на  $120^\circ$  относительно продольной оси. После этого операции измерения размера «под ключ» и контроля внешнего вида повторяются на других парах граней. Затем КМ поворачивает ТВС в положение минус  $120^\circ$  относительно исходного, после чего проводятся операции контроля оставшихся пар граней нижней, средней и верхней решеток и контроль внешнего вида оставшихся граней ТВС. При положительных результатах контроля ТВС помещается в пенал для отправки на склад готовой продукции. При выходе размера под «ключ» хотя бы одной пары граней за пределы допуска или обнаружении несоответствия по внешнему виду ТВС после запеналивания отправляется на склад бракованной продукции [20].

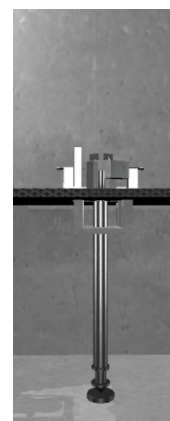
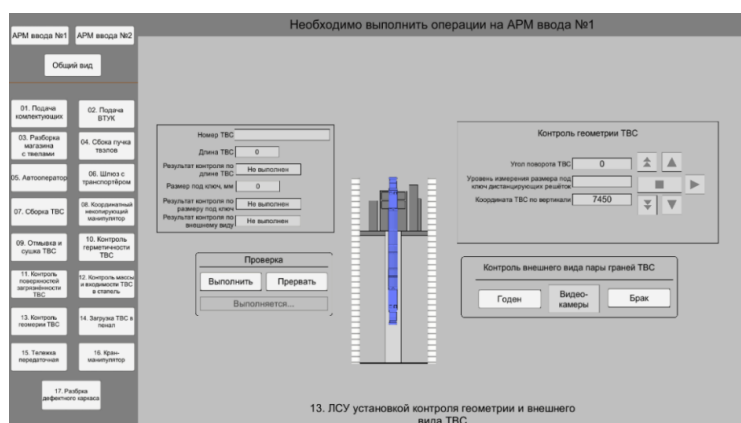


Рис. 8. Мнемосхема и 3D визуализация установки контроля геометрии и внешнего вида ТВС

## Заключение

Опыт применения трехмерных моделей показывает актуальность использования технологий виртуальной реальности в ядерной энергетике. Программное обеспечение виртуальной реальности позволяют создавать модели технологического оборудования ядерных энергетических устройств с учетом антропометрических характеристик.

Использование инструментов виртуальной реальности, таких как Unity 3D позволяет создавать среды для обучения и моделирования технологических линий, обеспечивать вычислительные модели, строить модели с максимальной приближенностью к реальности.

Программно-технический инструментарий в этом исследовании позволил моделировать участок сборки и контроля тепловыделяющих элементов. В данной работе были визуализированы определенные установки контроля ТВС такие как, участок сборки ТВС, установка отмытки и сушки ТВС, установка контроля герметичности ТВС, установка контроля поверхностной загрязненности ТВС, установка контроля массы ТВС, контроля входимости ТВС в стапель, работоспособности механизма управления хвостом-

виком, перемещения РО СУЗ (для ТВС с РО СУЗ), установка контроля геометрии и внешнего вида ТВС.

Результаты визуализации установок контроля тепловыделяющих элементов позволяют:

- наглядно увидеть расположение основных компонентов сборки и контроля ТВС.
- наблюдать за процессом и последовательностью операций, выполняемых в процессе установок контроля.
- управлять технологическими операциями сборки и контроля с помощью видеокадров.

Разработанная система позволяет производить обучение специалистам, работающим в атомной отрасли по производству ядерных энергетических устройств. Достоинство данной разработки заключается в том, что она максимально приближена к технологиям реального оборудования, мобильна и не требует больших экономических затрат. Также она обеспечивает высокий уровень радиационной безопасности и в будущем может быть внедрена в центры по подготовке персонала в атомной промышленности.

## Список литературы

1. Линовес Дж. Виртуальная реальность в Unity/Дж. Линовес; пер. с англ. Рагимов Р. Н. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 316 с.: ил.
2. A.V. Maltsev. Computer Simulation and Visualization of Wheel Tracks on Solid Surfaces in Virtual Environment (2023). Scientific Visualization 15.2: 80–89, DOI: 10.26583/sv.15.2.07
3. P.Yu. Timokhin, M.V. Mikhaylyuk. Hybrid Visualization with Vulkan-OpenGL: Technology and Methods of Implementation in Virtual Environment Systems (2023). Scientific Visualization 15.3: 7–17, DOI: 10.26583/sv.15.3.02
4. A.V. Maltsev. Integration of Physical Reality Objects with Their 3D Models Visualized in Virtual Environment Systems (2024). Scientific Visualization 16.2: 97–105, DOI: 10.26583/sv.16.2.08
5. Смирнов А.С., Фадеев К.А., Аликовская Т.А., Тумялис А.В., Голохваст К.С. Технологии виртуальной реальности в образовательном процессе: перспективы и опасности // Информатизация образования. –2020.–№6(315).
6. Воынов М.М., Китов А.А., Горячкин Б.С. Виртуальная реальность: виды, структура, особенности, перспективы развития // Информационные технологии. –2020.
7. Unity [Электронный ресурс] — URL: <https://unity.com/ru>
8. Unity User Manual 2021.3 (LTS) [Электронный ресурс] — URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/UnityManual.html>
9. Хокинг Дж. Unity в действии. Мультиплатформенная разработка на C#. Перевод с английского Рузмайкина И. – 2-е межд. изд. — СПб.: Питер, 2019. — 352 с.
10. Торн, А. Искусство создания сценариев в Unity/А. Торн; пер. с англ. Р. Н. Рагимов — М.: ДМК Пресс, 2016. — 360 с.: ил.
11. Unity Asset Store [Электронный ресурс] — URL: <https://assetstore.unity.com/>
12. Oculus App Development in Unity [Электронный ресурс] — URL: <https://developer.oculus.com/documentation/unity>
13. Meta [Электронный ресурс] — URL: <https://www.meta.com/>
14. Vive [Электронный ресурс] — URL: <https://www.vive.com/ru/>
15. Руководство по эксплуатации 1099.604.000РЭ: Установка крепления головок на каркасе ТВС "Сибирский химический комбинат", 2015. — С. 28
16. Руководство по эксплуатации А.11.1232.000РЭ: Установка отмычки и сушки ТВС "Сибирский химический комбинат", 2018. — С. 24
17. Руководство по эксплуатации 1099.606.000РЭ: Установка контроля герметичности ТВС "Сибирский химический комбинат", 2016. — С. 31

18. Руководство по эксплуатации 1099.595.000РЭ: Участок сборки и контроля ТВС "Сибирский химический комбинат", 2017. – С. 45
19. Руководство по эксплуатации 1099.607.000РЭ: Установка контроля массы ТВС, контроля входимости ТВС в стпель, работоспособности механизма управления хвостовиком, перемещения РО СУЗ "Сибирский химический комбинат", 2015. – С. 50
20. Руководство по эксплуатации 1099.608.000РЭ: Установка контроля геометрии и внешнего вида ТВС "Сибирский химический комбинат", 2016. – С. 30

## **Список сокращений**

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

АРМ – автоматизированное рабочее место

БРЕСТ – российский проект реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, двухконтурной схемой отвода тепла к турбине и закритическими параметрами пара

КМ – координатный манипулятор

РУ – реакторная установка

ТВС – тепловыделяющая сборка

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

ПЧТ – порог чувствительности течеискателя

ПЧС – порог чувствительности системы

ЛСУ – локальная система управления

РО СУЗ – рабочий орган системы управления и защиты RCPS

С# – язык программирования C Sharp

VR – виртуальная реальность

2D – двумерное пространство

3D – трёхмерное пространство

# Visualization of the Assembly and Control Area of the BREST-OD-300 Reactor FA Using Virtual Reality Technologies

A.O. Tolokonskiy<sup>1</sup>, D.G. Kovalionok<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup> ORCID: 0009-0006-7800-4660 , [toloconne@yandex.ru](mailto:toloconne@yandex.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1449-8263 , [faith.science.denis.kovalionok@gmail.com](mailto:faith.science.denis.kovalionok@gmail.com)

## Abstract

Currently, virtual reality technologies are used to train specialists in the field of nuclear energy, which allow the student to directly immerse himself in the environment of his activity, to carry out training as close as possible to real conditions, without causing harm to his health. In order to manufacture a fuel assembly (FA), it is necessary to undergo a number of control settings at the production stage, confirming quality and safety. The authors proposed the development of a virtual simulator with fuel assembly control installations for the BREST-OD-300 reactor plant, such as: washing and drying fuel assemblies, monitoring the tightness of fuel assemblies, monitoring the surface contamination of fuel assemblies, monitoring the mass and inclusion of fuel assemblies in the slipway, monitoring the geometry of fuel assemblies.

This simulator was developed in the Unity environment using Oculus virtual reality glasses. The results of visualization of the inspection area make it possible to check the appearance of the fuel assembly for the presence of defects and damage, measure the mass and length of the fuel assembly, as well as check for leaks, absence of leaks and contamination.

**Keywords:** training simulators, three-dimensional modeling, graphic objects, fuel assembly, visual representation.

## References

1. Linoves J. Virtual Reality in Unity/J. Linoves; trans. from English. Ragimov R. N. – M.: DMK Press, 2016. – 316 p.: ill.
2. A. V. Maltsev. Computer Simulation and Visualization of Wheel Tracks on Solid Surfaces in Virtual Environment (2023). Scientific Visualization 15.2: 80–89, DOI: [10.26583/sv.15.2.07](https://doi.org/10.26583/sv.15.2.07)
3. P. Yu. Timokhin, M. V. Mikhaylyuk. Hybrid Visualization with Vulkan-OpenGL: Technology and Methods of Implementation in Virtual Environment Systems (2023). Scientific Visualization 15.3: 7–17, DOI: [10.26583/sv.15.3.02](https://doi.org/10.26583/sv.15.3.02)
4. A.V. Maltsev. Integration of Physical Reality Objects with Their 3D Models Visualized in Virtual Environment Systems (2024). Scientific Visualization 16.2: 97–105, DOI: [10.26583/sv.16.2.08](https://doi.org/10.26583/sv.16.2.08)
5. Smirnov A.S., Fadeev K.A., Alikovskaya T.A., Tumyalis A.V., Golokhvast K.S. Virtual reality technologies in the educational process: prospects and dangers // Informatization of education. -2020.-№6(315).
6. Volynov M.M., Kitov A.A., Goryachkin B.S. Virtual reality: types, structure, features, development prospects // Information technologies. -2020.
7. Unity [Electronic resource] — URL: <https://unity.com/ru>
8. Unity User Manual 2021.3 (LTS) [Electronic resource] — URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/UnityManual.html>



9. Hawking J. Unity in Action. Multiplatform Development with C#. Translated from English by Ruzmaikina I. - 2nd int. ed. - St. Petersburg: Piter, 2019. - 352 p.
10. Thorne, A. The Art of Scripting in Unity / A. Thorne; trans. from English by R. N. Ragimov - M.: DMK Press, 2016. -- 360 p.: ill.
11. Unity Asset Store [Electronic resource] — URL: <https://assetstore.unity.com/>
12. Oculus App Development in Unity [Electronic resource] — URL: <https://developer.oculus.com/documentation/unity>
13. Meta [Electronic resource] — URL: <https://www.meta.com/>
14. Vive [Electronic resource] — URL: <https://www.vive.com/ru/>
15. Operation manual 1099.604.000PE: Installation of head fastening on the frame of the FA "Siberian Chemical Plant", 2015. - P. 28
16. Operation manual A.11.1232.000PE: Installation of unlocking and drying of the FA "Siberian Chemical Plant", 2018. - P. 24
17. Operation manual 1099.606.000RE: Fuel assemblies leak test unit "Siberian Chemical Plant", 2016. - P. 31
18. Operation manual 1099.595.000RE: Fuel assemblies assembly and test section "Siberian Chemical Plant", 2017. - P. 45
19. Operation manual 1099.607.000RE: Fuel assemblies mass test unit, fuel assemblies entry test unit into the slipway, tailstock control mechanism operability, and control rod movement test unit "Siberian Chemical Plant", 2015. - P. 50
20. Operation manual 1099.608.000RE: Installation for control of geometry and appearance of fuel assemblies "Siberian Chemical Plant", 2016. - P. 30

## **List of abbreviations**

- APCS – automated process control system  
 AWS – automated workstation.  
 BREST – russian project of fast neutron reactors with lead coolant, dual-circuit heat removal to the turbine and supercritical steam parameters  
 CM – coordinate manipulator  
 RU – reactor unit  
 FA – fuel assembly  
 FE – fuel element  
 LDST – leak detector sensitivity threshold  
 SST – system sensitivity threshold  
 LCS – local control system  
 RCPS – reactivity control and protection system rod  
 C# – C Sharp programming language  
 VR – virtual reality  
 2D – two-dimensional space  
 3D – three-dimensional space