

Концепция комплексного цифрового двойника сложного инженерного объекта на примере исследовательского реактора НИЯУ МИФИ

М.Г. Жабицкий, С.А. Ожерельев, Г.В. Тихомиров

Аннотация—В статье рассмотрена концепция комплексного цифрового двойника сложного инженерного объекта, интегрирующего BIM- модель, пространственную компоновку инженерных систем, физические модели происходящих процессов в различных режимах, построение атрибутов инженерных компонент и коммуникаций, модели данных при эмуляции управления объектом. Интеграция цифрового двойника реализуется в виде объекта виртуальной реальности. В ходе настоящей работы как источник данных рассматривается исследовательский ядерный реактор НИЯУ МИФИ. Данная публикация является стартовой в проекте, описывающем серию исследовательских работ по разработке цифрового двойника. Конечной целью проекта является продуктивное использование реализованного в виртуальной реальности интерактивного цифрового двойника для построения образовательного процесса в сфере ядерной физики и технологий для широкого круга пользователей. Также, еще одним результатом реализации изложенных в статье подходов будет разработка методики, пригодной для построения комплексных цифровых двойников для реализации приложений в интересах различных отраслей индустрии и экономики. Фокусом приложений разрабатываемой методики в данном исследовании является образовательная деятельность. В работе сочетается опыт построения цифровых двойников образовательных объектов, накопленный НИЯУ МИФИ и отраслевые подходы к построению инженерных двойников, разработанные в рамках деятельности различных дивизионов корпорации Росатом. В статье изложена принципиальная концепция работ с видением сочетания в едином проекте различных технологий цифрового моделирования для достижения целевого результата.

Ключевые слова—Цифровой двойник, технология виртуальной и дополненной реальности, BIM- технология, математическое моделирование ядерно-физических процессов.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительный интерес представляет

Статья получена 20 июля 2021.

М. Г. Жабицкий, Заместитель директора Высшей инженерной школы НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., 31 (jabitsky@mail.ru).

С. А. Ожерельев, Главный инженер ИРТ НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., 31 (SAOzherelyev@mephi.ru).

Г. В. Тихомиров, Заместитель директора Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., 31 (GVTikhomirov@mephi.ru).

применение технологии цифровых двойников как нового подхода к описанию и использованию различных сложных объектов. Цели такого использования достаточно разнообразны [1-3]. Цифровые двойники служат как для оптимизации различных операций с реальными объектами в ходе их жизненного цикла, так и для их частичной замены в определенных ситуациях [4]. Примерами первого подхода служит построение цифровых двойников в ходе проектирования, эксплуатации и утилизации инженерных объектов. Применение технологий трехмерного проектирования и цифрового моделирования процессов сооружения, а также технологических процессов позволяет снизить издержки и повысить эффективность инженерных и бизнес-процессов в реальности. Такой подход широко применяется в промышленности, строительстве, транспорте, городском хозяйстве и других сферах продуктивной деятельности [5,6]. В рамках другого подхода цифровые двойники используются для частичной замены реальных объектов в культурно-просветительской и образовательной сферах. Аналогично, для целей научных исследований и разработок, создания новой продукции, виртуального прототипирования и моделирования научных экспериментов также используется подход, основанный на построении и визуализации математических и геометрических моделей объектов и процессов. В настоящее время для целей управления производственными предприятиями, экономической оптимизаций, объективного учета издержек и предиктивного моделирования последствий принятых управленческих решений также широко используется понятие цифрового двойника предприятий, производств и бизнес-процессов. В медицине появилось понятие "цифровой двойник пациента"[7-9]. Таким образом, мы наблюдаем применение технологии построения цифровых двойников широким кругом специалистов в различных целях [10-11]. И тем не менее, употребление данного понятия обосновано во всех упомянутых ситуациях.

Прежде чем приступить к описанию конкретного цифрового двойника, являющегося предметом исследования в данной работе, обсудим понимание этого термина. Это необходимо именно вследствие его принципиально междисциплинарного характера.

Начнём с базовой формулировки, приведённой в Википедии: «Цифровой двойник (англ. Digital Twin) — цифровая копия физического объекта или процесса, помогающая оптимизировать эффективность бизнеса. Концепция «цифрового двойника» является частью четвёртой промышленной революции и призвана помочь предприятиям быстрее обнаруживать физические проблемы, точнее предсказывать их результаты и производить более качественные продукты» [12]. В принципе в этой формулировке всё правильно. Однако её важно дополнить пониманием, что с точки зрения разных специалистов и для решения различных задач цифровой двойник может и должен выглядеть по-разному. Так реальный объект, например промышленное здание по-разному описывается строителем, специалистом по пожарной безопасности, экономистом или инженером по эксплуатации. При этом в качественном цифровом двойнике должны быть заложены возможности получения информации для решения широкого круга задач с точки зрения разных специальностей, а также комплексного междисциплинарного анализа поведения объекта при естественном функционировании, а также при различных нетривиальных внешних воздействиях и сценариях развития [13,14].

Поэтому сформулируем несколько более сложное и абстрактное понимание цифрового двойника объекта. На верхнем уровне понимания цифровой двойник представляет с собой совокупность данных и их взаимосвязей, отображающих разнообразные существенные параметры, а также динамику характеризующих объект данных. Такой комплекс данных и их взаимосвязей реализуется в форме цифровой компьютерной модели и может быть воспринят человеком в различных формах, как через каналы прямого восприятия мультимедийных данных (визуальных, звуковых и иных), так и путём когнитивного анализа.

Прежде чем формулировать непосредственно подходы к построению комплексного цифрового двойника исследовательского ядерного реактора НИЯУ МИФИ (ИРТ МИФИ), опишем цели функционирования ИРТ МИФИ, а также круг лиц, связанных с этими процессами. Исследовательский ядерный реактор не служит для выработки тепловой или электрической энергии. Продуктом его функционирования является нейтронное излучение высокой плотности для проведения учебных и научных экспериментов. Соответственно, в ходе эксплуатации реактора как физической установки задействован эксплуатационный персонал, физики-экспериментаторы, преподавательский состав ВУЗа и студенты. Полный жизненный цикл ИРТ МИФИ включает в себя несколько этапов: проектирование, сооружение, ввод в эксплуатацию, эксплуатацию, а также, в будущем - вывод из эксплуатации и утилизацию объекта. На территории ИРТ функционирует базовый набор сооружений и оборудования, обеспечивающих его основную функцию. Кроме этого, разворачиваются дополнительные экспериментальные установки и стенды для проведения различных экспериментов, как

стандартных, задействованных в учебном процессе, так и уникальных исследовательских. Отдельный класс заинтересованных лиц в ходе эксплуатации ИРТ МИФИ представляют теоретики и расчетчики, разрабатывающие и испытывающие модели процессов и явлений, а также методы расчетного моделирования ядерно-физических процессов, процессов переноса нейтронов и взаимодействия их с веществом, гидродинамических и теплофизических процессов в реакторе. Не участвуя непосредственно в процессе эксплуатации реактора и проведении экспериментов, данный круг лиц также самым непосредственным образом заинтересован в построении максимально адекватных информационных моделей и цифрового двойника данного объекта. При этом важно, чтобы цифровой двойник позволял не только воспроизводить фактически произошедшие события, но и допускал анализ нетривиальных сценариев событий и режимов, в том числе не предусмотренных проектными решениями. Также, кроме студентов НИЯУ МИФИ, для которых часть образовательного процесса штатным образом связана с лабораторными работами и экспериментами на ИРТ, в круг заинтересованных лиц можно включить студентов других вузов, для подготовки которых возможность взаимодействия с такой уникальной физической установкой была бы полезна. В качестве еще одной группы лиц, заинтересованных в реализации комплексного проекта цифрового двойника сложного инженерного объекта на примере ИРТ МИФИ, необходимо упомянуть методологов и практиков цифрового моделирования. Создание цифровых двойников высокотехнологичных инженерных объектов является в настоящее время передовым краем методологических и практических работ в Росатоме и в других отраслях высокотехнологичной промышленности. Данная работа даст этому кругу заинтересованных лиц новый опыт и знания для непосредственного использования перспективных технологий в практической инженерной и научной деятельности.

II. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Опишем подробнее объект моделирования в ходе данного исследования. Атомный центр Московского инженерно-физического института – АЦ МИФИ создан на базе исследовательского ядерного реактора как учебно-научно-методический комплекс коллективного пользования, существенно расширяющий возможности проведения научных исследований кафедрами института. В 1958 году Советы Министров СССР и РСФСР приняли по инициативе Академии Наук и Минвуза СССР решения о сооружении типовых исследовательских ядерных реакторов в некоторых институтах академий наук союзных республик и высших учебных заведениях и, в том числе, в МИФИ. Последнее в значительной степени определило место размещения комплекса МИФИ не на Ленинских горах, а на берегу реки Москвы в поселке Москворечье рядом с предприятиями отраслевого министерства. Для учебного заведения, размещенного в Москве, был выбран реактор ИРТ-1000 бассейнового типа с эжекторной системой охлаждения, который до сих пор

наиболее полно отвечает концепции безопасности ядерно-энергетических установок, т.е. в полной мере безопасен при отказе систем электроснабжения и принудительного охлаждения [15-17]. Проект и технология сооружения реактора были разработаны институтами отраслевого министерства под научным руководством ИАЭ им. И.В. Курчатова. Строительство реактора начато в 1962 году. В мае 1967 года были завершены наладочные работы. В марте 1966 года в институте было организовано подразделение «Реактор ИРТ». 26 мая 1967 года в 23 часа 35 минут реактор достиг критического состояния – состоялся физический пуск. ИРТ МИФИ – серийный реактор и проектировался в конце 50-х годов прошлого века, однако усилиями научного и эксплуатационного персонала многие из его систем и узлов модернизированы так, что и в настоящее время он работоспособен и безопасен. Реактор находится под контролем государственных органов надзора и МАГАТЭ. Реактор расположен в специально возведенном здании, в котором смонтировано оборудование и коммуникации большинства инженерных систем. Часть систем вынесено из здания, например система водоподготовки и охладительные градирни. В настоящее время (лето 2021 года) ИРТ МИФИ имеет лицензию на эксплуатацию в режиме длительного останова. Исследовательский реактор НИЯУ МИФИ расположен на территории университета. Это специализированное здание, спроектированное целевым образом для размещения столь необычного объекта. Здание включает однообъемный реакторный зал высотой в 4 этажа, помещения для размещения инженерных систем, обеспечивающих функционирование реактора, и помещения для работы эксплуатирующего персонала и научных сотрудников, а также работы студентов.

III. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ХАРАКТЕР ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИРТ МИФИ. МЕТОДИКА И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Итак, цифровой двойник сложного инженерного объекта должен обеспечивать разностороннее моделирование его поведения для различных целей. Кроме того, даже для конкретного потребителя могут быть использованы различные технологии моделирования. В данном разделе мы опишем подходы к информационному моделированию рассматриваемого объекта.

В основе цифрового двойника лежит пространственная модель. На современном уровне технологии проектирования и управления жизненным циклом инженерного объекта цифровой двойник строится на базе BIM-технологии. В реальности объект проектировался примерно 60 лет назад, соответственно проектные материалы представлены в формате бумажной документации, включающей чертежи, спецификации, пояснительные записки и другие документы. Для построения полноценной BIM-модели необходимо не только перенести пространство здания в современные инструменты трехмерного проектирования, но и декомпозировать инженерные системы на элементы, выстроить структуру

атрибутивной информации для всех компонент и модели в целом, а затем наполнить модель актуальными для поставленных целей данными. Важно понимать, что в современных библиотеках отсутствуют большинство моделей единиц оборудования произведенных в прошлом веке. Поэтому, для ряда элементов нужно будет провести реконструкцию на основе технологий полноценного реверсивного инжиниринга [18]. В качестве инструмента реверсивного проектирования предполагается использовать продукт Autodesk Revit [19]. Также важно для процесса реверсивного проектирования учитывать, что в ходе в эксплуатации объекта в режиме проведения многочисленных экспериментов, в реакторном зале развернуты устройства и оборудование, отсутствующие в проектной документации. Но для адекватного моделирования текущего состояния объекта их желательно включить в BIM модель. В целом это означает, что в ходе построения 3D модели объекта в технологии BIM-проектирования желательно использовать как документацию, так и обмеры и результаты лазерного сканирования реального расположения архитектурных элементов и инженерного оборудования ИРТ. С методической точки зрения эти обстоятельства делают проект особенно интересным. Нам не известно в настоящее время о реализации в России полноценного проекта реверсивного проектирования высокотехнологичного инженерного объекта с построением полной BIM модели. Поэтапная реализация такой задачи крайне своевременна для создания рекомендаций, выявления рисков и затруднений для её решения.

Однако создание BIM модели не является единственной целью проекта. В ходе эксплуатации исследовательского реактора накоплен значительный объём знаний по моделированию сложных физических процессов, как для стандартных для образовательного процесса режимов эксплуатации, так и для ситуаций, не предусмотренных проектными решениями и регламентами. Эти расчётные модели описывают ядерно-физические процессы в активной зоне реактора, механизмы переноса нейтронов в реакторном бассейне и в каналах, гидравлические и теплофизические процессы в бассейне и в системах охлаждения. Могут быть построены модели работы инженерного оборудования, управляющего активной зоной, процессами теплопереноса и циркуляции охлаждающей воды. Многие эти задачи решены и представлены в виде частных цифровых моделей [20]. Однако полная их интеграция в едином цифровом продукте для разных режимов сочетания управляющих параметров не реализована. Современный уровень понимания физических моделей практически всех процессов, протекающих в реакторе, позволяет в дополнение к Building Information Model ИРТ МИФИ построить его комплексную многодисциплинарную физическую информационную модель (Physical Information Model, PhIM). Такая модель должна позволять предсказывать динамику изменения разнообразных физических параметров под воздействием исполнительных инженерных механизмов реакторной установки в зависимости от начальных условий - конфигурации

активной зоны, положения рабочих органов системы управления защитой реактора, положения запорной арматуры и режимов насосов циркуляции охлаждающей воды. Также может моделироваться работа систем спецвентиляции, обеспечивающей удаление загрязнений из надреакторного пространства, зоны хранения ядерного топлива и других мест с повышенным радиационным фоном. Построение комплексной РnIM может вестись поэтапно, путем модификации базовых моделей. Итоговый цифровой продукт может формировать поля физических параметров во всём пространстве экспериментальной установки, а также в здании реактора в целом. По аналогии с информационной моделью здания (BIM), комплексная физическая информационная модель должна быть принципиально междисциплинарна и разномасштабна. Только такой подход, интегрирующий все частные физические и физико-инженерные аспекты позволит получить качественный скачок возможностей при работе всех видов пользователей с информационной моделью как с единым цифровым продуктом. В настоящее время учеными и специалистами МИФИ разработаны важнейшие компоненты такого цифрового двойника, а их интеграция может рассматриваться как одна из задач настоящего проекта.

Третьим аспектом моделирования является проработка модели данных, связывающих функционирование реакторной установки как физической системы, управляющих воздействий оператора и автоматики на протекание физических процессов. Такой подход также не является принципиально новым [21], он реализуется при создании тренажеров сложных установок для различных отраслей промышленности. В частности, для ядерных реакторов тренажеры операторов на базе потоков данных имитационных моделей созданы для многих типов энергоблоков и широко используются для подготовки оперативного персонала [22-24]. В нашем случае такая модель данных должна быть заложена в комплексный цифровой двойник. При обсуждении вопроса о моделировании системы управления ИРТ МИФИ как инженерно-физическим объектом возникает определенная проблема. Дело в том, что действующий пульт управления, компьютерное оборудование и система управления объектом были созданы уже достаточно давно - равно как и ядерно-физическая часть объекта. Однако темп развития технологий информационного управления и компьютерной техники многократно выше. Поэтому, к настоящему моменту, ядерно-физическая и инженерная компоненты объекта вполне соответствуют современному уровню. А вот система цифрового управления выглядит и является достаточно устаревшей. С нашей точки зрения, спорной является целесообразность моделирования такой «исторической» системы для подготовки специалистов для будущих десятилетий. При этом, приборы контроля, генерируемые ими данные, каналы передачи цифровых и аналоговых данных должны воспроизводиться в соответствии с реальностью. Собственно, вопрос о соотношении моделирования исторического состояния объекта в точности и его технологических перспектив является одной из методологических проблем данной работы. К настоящему моменту окончательное мнение по данному вопросу не сформировано. Скорее всего, для

цифрового двойника ИРТ МИФИ будут опробованы и визуализация исторического пульта управления, и инновационный подход, основанный на эффективных веб-интерфейсах, применяемых для удалённого контроля и управления инженерными объектами через сайты в среде интернет.

IV. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА СЛОЖНОГО ИНЖЕНЕРНОГО ОБЪЕКТА В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Обсудим подробнее ещё одну инновационную технологию, изначально закладываемую в фундамент обсуждаемого проекта. Речь идёт про реализацию всех рассматриваемых моделей в режиме цифровой виртуальной реальности. С точки зрения процесса подготовки кадров любого уровня - будь то ознакомительные экскурсии, серьёзные ядерно-физические эксперименты или подготовка инженерно-эксплуатационного персонала, реализация модели в виртуальной реальности качественно повышает и уровень понимания, и возможности анализа, и эмоциональную компоненту взаимодействия с цифровым двойником [25-27]. Для современного цифрового моделирования в виртуальном пространстве имеется возможность не ограничиваться лишь геометрическими формами объектов, а визуализировать существенные физические явления в форме не видимых человеческим глазом полей физических параметров [28,29]. Имеется возможность изменять масштабы восприятия и темпы течения времени в ходе визуализации экспериментов. Современные технологии виртуальной реальности позволяют накладывать на неё потоки данных в текстовом, графическом и мультимедийном форматах. Построение таких систем дополненной реальности способно повысить уровень восприятия сущности и закономерностей отображаемых инженерных и физических процессов, обеспечить понимание и повысить качество реакции специалиста для различных ситуаций проведения лабораторных работ, физических экспериментов и инженерных тренингов. В рамках настоящего проекта будет реализовываться перевод объекта в режим виртуальной реальности для разных уровней восприятия - от глубокого погружения в бифокальную виртуальную реальность с использованием специальных шлемов и костюмов до простейшего отображения на мобильных устройствах небольшого размера. Естественно, уровень технического оснащения пользователя даст различные возможности для погружения в виртуальную и дополненную реальность. В ходе проекта реализуется как локальное погружение пользователей в обстановку виртуального исследовательского реактора на специализированных полигонах на территории НИЯУ МИФИ, так и подключение к виртуальному цифровому двойнику по удалённым каналам связи, в перспективе - с любого устройства через интернет из любой точки мира.

V. ЦЕЛЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРОЕКТА

Остановимся подробнее на обсуждении тех эффектов, которые реализация проекта принесёт как его участникам, так и другим заинтересованным сторонам.

Одной из проблем является объективная сложность лицензирования эксплуатации объектов использования атомной энергии в России и в мире вообще, а в крупных городах и в учебных заведениях - в особенности. Наличие действующей ядерно-физической установки подобного масштаба в московском ВУЗе уникально, однако текущий режим длительного останова не позволяет использовать ИРТ МИФИ в полном объеме. В такой ситуации даже студенты профильного ВУЗа - НИЯУ МИФИ вынуждены реализовывать часть практической подготовки в рамках образовательной программы "в тетрадке". Для большинства ВУЗов страны (в том числе для филиалов МИФИ), даже производящих целевую подготовку специалистов для Госкорпорации «Росатом», выполнение лабораторных работ и экспериментальных исследований по нейтронной физике недоступно в принципе. Естественно, такое положение вещей приводит к определённому дефициту компетенций выпускников.

Невозможно ожидать комплектование атомными реакторами территориально рассредоточенных филиалов МИФИ и других вузов, выпускающих специалистов в интересах Росатома. А вот построить образовательный процесс инновационным образом, по технологии лабораторных работ, реализуемых на базе цифрового двойника исследовательского ядерного реактора в виртуальной реальности - это прорывная образовательная технология, которая была недоступна ещё несколько лет назад [30]. Также, на базе совмещения BIM модели и физических моделей радиационных загрязнений возможно построение принципиально новых виртуальных лабораторных практикумов по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Моделирование, физическое и визуальное, запроектных аварий позволит разработать образовательные продукты, принципиально невозможные ранее - лабораторные работы по контролю обстановки в условиях чрезвычайных аварийных ситуаций на радиационно-опасных объектах и организации устранения их последствий. Также отдельным классом образовательных продуктов (лабораторных работ и тренингов), реализуемых на цифровом двойнике реального объекта, может стать пооперационная отработка сооружения и пуска атомного реактора, а также операций и технологий технического обслуживания и ремонта подобных объектов.

Важнейшим преимуществом такой технологии становится её доступность из любой точки мира, подключение к цифровому двойнику по интернет-каналам достаточной пропускной способности. То есть, вместо развертывания сложных лабораторных стендов в удалённых вузах мы сможем разворачивать там универсальные классы визуализации лабораторных работ. После отработки технологии такие образовательные продукты могут стать стандартом для разных предметных областей [30-31]. Тем самым, в значительной степени может быть устранено существующее неравенство доступа населения к образовательным услугам для различных регионов страны, а в перспективе - и мира

Также отметим, что комплексные цифровые двойники сложных инженерных объектов могут быть

использованы не только в процессе высшего образования, а и как база тренингов оперативного персонала в режиме дополнительной подготовки [32,33]. Также они могут использоваться при обсуждении и имитации выполнения сложных технологических операций при планировании сооружения строительных конструкций, монтажа сложного оборудования, реконструкции инженерных объектов и их выводе из эксплуатации [34-35]. Комплексный цифровой двойник исследовательского ядерного реактора НИЯУ МИФИ может послужить пилотным объектом для отработки данной технологии как в интересах атомной отрасли, так и для других промышленных партнеров.

Также данный проект может широко использоваться для популяризации научных знаний, научного туризма, для повышения заинтересованности учащейся молодёжи современными цифровыми технологиями, и для повышения культурного уровня население в целом.

VI. СОСТОЯНИЕ РАБОТ И ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПЛАН

Описываемый проект стартовал осенью 2020 года. К данному моменту дорожная карта проекта проработана на 5 лет. Её основные контрольные результаты описаны выше. В 2020 - 2021 годах идут работы по построению инженерной BIM-модели, физических моделей процессов в реакторе для интеграции, а также отработка высокопроизводительных технологий перевода инженерных параметрических моделей в пространство виртуальной реальности с визуализацией полей физических параметров.

Формируется перспективный реестр лабораторных работ и физических экспериментов для их включения в комплексной виртуальной двойник исследовательского ядерного реактора МИФИ. Данный реестр будет поэтапно расширяться на протяжении всего проекта. Комплексная цифровая модель будет дополняться цифровыми двойниками специальных исследовательских установок для возможности выполнения всё более широкого круга экспериментов в виртуальной реальности.

Для реализации проекта сформирован междисциплинарный коллектив в НИЯУ МИФИ. Коллектив включает в себя научно-педагогический и инженерный персонал, а также студентов разных курсов и аспирантов, специализирующихся по физическим специальностям и цифровым информационным технологиям, в том числе технологиям виртуальной реальности. В работе задействованы специалисты Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ, Высшей инженеринговой школы и ИРТ.

Интерес к проекту проявил ряд организаций Росатома, включая АО "Наука и инновации", АО "Атомстройэкспорт", АО «Прорыв». Для полномасштабной реализации проекта предполагается формирование совместной рабочей группы НИЯУ МИФИ с промышленными партнерами - организациями Росатома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей публикации рассмотрен инновационный

подход к построению комплексного цифрового двойника на основе глубокой интеграции технологий BIM-проектирования сложных инженерных объектов, математического моделирования сложных физических процессов и цифровой виртуальной реальности. Описана концепция построения проекта и эскиз дорожной карты, описаны целевые эффекты от его реализации. Сделан вывод о перспективности рассматриваемого подхода как для формирования инновационных образовательных продуктов в интересах высокотехнологичной индустрии и экономики, так и для формирования приложений для непосредственного использования предприятиями и организациями различных отраслей промышленности в ходе цифровой трансформации технологических, инженерных и бизнес-процессов.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Н. В. Курганова, М. А. Филин, Д. С. Черняев, А. Г. Шаклеин, Д. Е. Намиот “Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства” *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. №5
- [2] К. А. Шубенкова, Т. А. Николаев, В. Д. Шепелев, Н. А. Тюрин “Повышение эффективности процессов в дилерско-сервисных центрах с помощью технологии Digital Twin” *Вестник ЮУрГУ. Серия: Экономика и менеджмент*. 2018. №3
- [3] Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, М. С. Аносов, А. М. Кузьмишина “Разработка цифрового двойника станка с ЧПУ на основе методов машинного обучения” *Advanced Engineering Research*. 2019. №1
- [4] Е. Б. Фролов, А. С. Климов, М. М. Зин “Цифровой двойник производственной системы на основе программного обеспечения категории mes” *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2018. №12 (73)
- [5] В. П. Куприяновский, А. А. Климов, Ю. Н. Воропаев, О. Н. Покусаев, А. П. Добрынин, И. В. Понкин, А. А. Лысогорский “Цифровые двойники на базе развития технологий bim, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и ifrabim” *International Journal of Open Information Technologies*. 2020. №3
- [6] И. В. Тарасов, Н. А. Попов “Индустрия 4.0: трансформация производственных фабрик” *СРРМ*. 2018. №3 (108)
- [7] T. Bonnici, L. Tarassenko, D.A. Clifton, P. Watkinson “The digital patient” *Clin Med (Lond)*. 2013 Jun;13(3):252-7. DOI: 10.7861/clinmedicine.13-3-252. PMID: 23760698; PMCID: PMC5922668
- [8] D. Brown “Virtual patients are teaching doctors to better express empathy” *The Washington Post*. – URL: <https://www.washingtonpost.com/technology/2021/02/16/virtual-ai-hospital-patients/> (data access 01.04.2021)
- [9] H. Houten “The digital patient: will we one day have our own health avatars?” *Philips*. – URL: <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20181211-the-digital-patient-will-we-one-day-have-our-own-health-avatars.html> (data access 09.07.2021)
- [10] В.П.Куприяновский, А.А.Климов, И.Г. Гоц, А.Б.Володин, М.Г.Жабидский, Ю.В.Куприяновская “Технологии цифровых близнецов в транспортных коридорах для морских и водных путей в России” *International Journal of Open Information Technologies* ISSN: 2307-8162 2020 vol. 8, no.12
- [11] M G Zhabitskii, V E Melnikov and O V Boyko “Complex engineering object digital twins – power engineering smart transformation basic concept” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1035 2021 012050 doi:10.1088/1757-899X/1035/1/012050
- [12] С. В. Амелин, И. В. Щетинина “Организация производства в условиях цифровой экономики” *Организатор производства*. 2018. №4
- [13] В. В. Акбердина “Трансформация промышленного комплекса России в условиях цифровизации экономики” *Journal of new economy*. 2018. №3
- [14] А. Прохоров, М. Лысачев Научный редактор профессор А. Боровков “Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт.” Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил., URL: <https://digitalatom.ru/digital-twin-book> (дата обращения 09.07.2021)
- [15] Safety Standards, Specific Safety Guide No.SSG-39, Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants IAEA (2016)
- [16] G. Gluschke “Cyber Security at Nuclear Facilities: National Approaches” *Research project, Institute for Security and Safety, Fachhochschule Brandenburg University of Applied Sciences, randenburg an der Havel, Germany, 2015*, available at https://media.nti.org/pdfs/Cyber_Security_in_Nuclear_FINAL_UZN_Mggd.pdf
- [17] H. Yoshikawa, “A review on developing industrial standards to introduce digital computer application for nuclear I&C and HMIT in Japan”. *Nuclear Engineering and Technology*, 2013, 45(2), 165-178. DOI:10.5516/NET.04.2013.703
- [18] R. Maerani, Deswandri, S. Santoso, Sudarno, & I. D. Irianto, “Reverse engineering program using MBSE to support development of I&C system experimental power reactor from PLC to FPGA”. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1198(2). DOI:10.1088/1742-6596/1198/2/022015
- [19] И. С. Грибкова, Д. А. Горенко “Обзор программного обеспечения для использования BIM моделей” *Научные труды КубГТУ*, №2, 2018. С. 211-221
- [20] Hyunsoo Lee, Woo Chang Cha “Virtual Reality-Based Ergonomic Modeling and Evaluation Framework for Nuclear Power Plant Operation and Control” *Sustainability, MDPI, Open Access Journal*, vol. 11(9), pages 1-16, May, 2019
- [21] V. S. Volodin, A. O. Tolokonskii. “Concept of instrumentation of digital twins of nuclear power plants units as observers for digital NPP I&C system”. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1391(1). DOI:10.1088/1742-6596/1391/1/012083
- [22] П. А. Бунто, В. А. Куликов “Применение виртуальной реальности и имитационных моделей для эффективной и безопасной эксплуатации промышленных объектов” http://www.neolant.ru/press-center/aboutus/index.php?ELEMENT_ID=2003 (дата обращения 09.07.2021)
- [23] PACY “Виртуальная реальность на службе атому” <https://rasu.ru/info/news/virtualnaya-realnost-na-sluzhbe-atomu> (дата обращения 09.07.2021)
- [24] Атомная электростанция использует VR для тренировки персонала. [электронный ресурс]: VR Journal. – Режим доступа: <https://vr-j.ru/news/atomnaya-elektrostantsiya-ispolzuet-vr-dlya-trenirovki-personala> (дата обращения 09.07.2021)
- [25] А. Н. Феофанов, А. В. Охмат, А. В. Бердюгин “VR/AR-технологии и их применение в машиностроении” *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2019. №4 (6)
- [26] А. И. Соснило, М. Д. Устюжанина “Технологии виртуальной и дополненной реальности как факторы государственной экономической политики и роста конкурентоспособности бизнеса” *Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки*. 2019. №2
- [27] О. В. Черченко “Технологии дополненной и виртуальной реальности в медицине: анализ конкурентного ландшафта” *Экономика науки*. 2018. №1
- [28] B. Dave, A. Buda, A. Nurminen, K.Främling “A framework for integrating BIM and IoT through open standards” *Automation in Construction*. 95 (2018) 35–45
- [29] W. Natephraa, A. Motamedi “Live Data Visualization of IoT Sensors Using Augmented Reality (AR) and BIM” *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019)*
- [30] В.И. Романенко, П.К. Кирюхин, П.А. Пугачев, Д.А. Хомяков, А.А. Щербаков, И.М. Юшин, Г.В. Тихомиров “ВИРТУАЛЬНЫЕ АНАЛОГИ ФИЗИЧЕСКИХ СТЕНДОВ НИЯУ МИФИ” *АВТОМАТИЗАЦИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ 2021 № 6 33-37*
- [31] E A Dashanova, E A Zadeba, P K Kiryukhin, P A Pugachev, V I Romanenko, G V Tikhomirov, D A Khomyakov, A A Shcherbakov, I M Yushin “Development of virtual analogues of nuclear facilities in virtual reality” *Journal of Physics: Conference Series* 1689 (2020) 012062 doi:10.1088/1742-6596/1689/1/012062
- [32] Kiryukhin P., Shcherbakov A., Romanenko V., Pugachev P., Khomyakov D., Tikhomirov, G., Zadeba E. “Development of a virtual analogue of uranium-graphite subcritical assembly and visualization of the neutron flux distribution in virtual reality”. *Procedia Computer Science*, 2020, 169, p. 192-197. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.135
- [33] T. Gavrilova, O. Zhigalova “Prospects for an activity-based approach to the design and use of VR simulators in vocational training” 2021

Paper presented at the E3S Web of Conferences, 273
DOI:10.1051/e3sconf/202127312105

- [34] O. Simonova, V. Barashyan, A. Gampartsumov, M. Khlebnikova “The application of reality simulators for improving the education quality at universities”. *2021 Paper presented at the E3S Web of Conferences, 273*. DOI:10.1051/e3sconf/20212731208
- [35] J. Naish, A. Burns “Minimising operator dose during JET shutdown using virtual” *Fusion Engineering and Design, 2017 124, 1215-1218* DOI:10.1016/j.fusengdes.2017.03.131
- [36] M G Zhabitskii, V E Melnikov, O V Boyko “Complex engineering object digital twins – power engineering smart transformation basic concept” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1035 (2021) 012050* doi:10.1088/1757-899X/1035/1/012050

The complex digital twin concept for a complex engineering object such as the research reactor of the MEPHI University

M.G. Zhabitskii, S.A. Ozhereljev, G.V. Tikhomirov

Abstract-The article considers the complex digital twin concept for a complex engineering object/ Digital twin integrates a BIM model, the spatial layout of engineering systems, physical models of physical processes occurring in various modes, the construction of attributes of engineering components and communications, data models for emulating object management. The integration of the digital twin is implemented in the form of a virtual-reality technology. In the course of this work, the MEPHI research nuclear reactor is considered as a data source. This publication is the starting point in a project describing a series of research works on the development of a digital double. The goal of the project is the productive use of an interactive digital double implemented in virtual reality for the purposes of building an educational process in the field of nuclear physics and technology for a wide range of users. Also, another result of the implementation of the approaches outlined in the article will be the development of a proven methodology suitable for building complex digital doubles for implementing applications in the interests of various industries and the economy. The focus of the applications of the developed methodology in this study is educational activities. The work will combine the experience of building digital twins of educational facilities accumulated by the MEPHI University and industry approaches to building engineering doubles developed within the framework of the activities of various divisions of the Rosatom Corporation. The article describes the basic concept of work with the vision of combining various digital modeling technologies in a single project to achieve the target result.

Keywords-Digital twin, virtual and augmented reality technology, BIM technology, mathematical modeling of nuclear physical processes.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] N. V. Kurganova, M. A. Filin, D. S. Chernyaev, A. G. SHaklein, D. E. Namiot “Vnedrenie cifrovoyh dvoynikov kak odno iz klyuchevykh napravleniy cifrovizatsii proizvodstva” (in Russian) *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. №5
- [2] K. A. SHubenkova, T. A. Nikolaev, V. D. SHepelev, N. A. Tyurin “Povyshenie effektivnosti processov v dilersko-servisnykh centrakh s pomoshch'yu tekhnologii Digital Twin” (in Russian) *Vestnik YUUrGU. Seriya: Ekonomika i menedzhment*. 2018. №3
- [3] YU. G. Kabaldin, D. A. SHatagin, M. S. Anosov, A. M. Kuz'mishina “Razrabotka cifrovogo dvoynika stanka s CHPU na osnove metodov mashinnogo obucheniya” (in Russian) *Advanced Engineering Research*. 2019. №1
- [4] B. Frolov, A. S. Klimov, M. M. Zin “Cifrovoy dvoynik proizvodstvennoy sistemy na osnove programmnogo obespecheniya kategorii mes” (in Russian) *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. №12 (73)
- [5] V. P. Kupriyanovskij, A. A. Klimov, YU. N. Voropaev, O. N. Pokusaev, A. P. Dobrynin, I. V. Ponkin, A. A. Lysogorskiy “Cifrovye dvoyniki na baze razvitiya tekhnologij bim, svyazannye ontologiyami, 5G, IoT i smeshannoy real'nost'yu dlya ispol'zovaniya v infrastrukturykh proektakh i ifrabim” (in Russian) *International Journal of Open Information Technologies*. 2020. №3
- [6] I. V. Tarasov, N. A. Popov “Industriya 4.0: transformatsiya proizvodstvennykh fabrik” (in Russian) *SRRM*. 2018. №3 (108)
- [7] T. Bonnici, L. Tarassenko, D.A. Clifton, P. Watkinson “The digital patient” *Clin Med (Lond)*. 2013 Jun;13(3):252-7. DOI: 10.7861/clinmedicine.13-3-252. PMID: 23760698; PMCID: PMC5922668
- [8] D. Brown “Virtual patients are teaching doctors to better express empathy” *The Washington Post*. – URL: <https://www.washingtonpost.com/technology/2021/02/16/virtual-ai-hospital-patients/> (data access 01.04.2021)
- [9] H. Houten “The digital patient: will we one day have our own health avatars?” *Philips*. – URL: <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20181211-the-digital-patient-will-we-one-day-have-our-own-health-avatars.html> (data access 09.07.2021)
- [10] V.P.Kupriyanovskij, A.A.Klimov, I.G. Goc, A.B.Volodin, M.G.ZHabickij, YU.V.Kupriyanovskaya “Tekhnologii cifrovoyh bliznecov v transportnykh koridorakh dlya morskikh i vodnykh putej v Rossii” (in Russian) *International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 2020 vol. 8, no.12*
- [11] M G Zhabitskii, V E Melnikov, O V Boyko “Complex engineering object digital twins – power engineering smart transformation basic concept” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1035 2021 012050* doi:10.1088/1757-899X/1035/1/012050
- [12] S. V. Amelin, I. V. SHCHetinina “Organizatsiya proizvodstva v usloviyakh cifrovoy ekonomiki” (in Russian) *Organizator proizvodstva*. 2018. №4
- [13] V. V. Akberdina “Transformatsiya promyshlennogo kompleksa Rossii v usloviyakh cifrovizatsii ekonomiki” (in Russian) *Journal of new economy*. 2018. №3
- [14] A. Prohorov, M. Lysachev Nauchnyj redaktor professor A. Borovkov “Cifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoj opyt.” (in Russian) Izdanie pervoe, ispravlennoe i dopolnennoe. – M.: OOO «Al'yansPrint», 2020. – 401 стр., ил., URL: <https://digitalatom.ru/digital-twin-book> (at 09.07.2021)
- [15] Safety Standards, Specific Safety Guide No.SSG-39, Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants IAEA (2016)
- [16] G. Gluschke “Cyber Security at Nuclear Facilities: National Approaches” Research project, Institute for Security and Safety, Fachhochschule Brandenburg University of Applied Sciences, randenburg an der Havel, Germany, 2015, available at https://media.nti.org/pdfs/Cyber_Security_in_Nuclear_FINAL_UZN_Mggd.pdf
- [17] H. Yoshikawa, “A review on developing industrial standards to introduce digital computer application for nuclear I&C and HMIT in Japan”. *Nuclear Engineering and Technology*, 2013, 45(2), 165-178. DOI:10.5516/NET.04.2013.703
- [18] R. Maerani, Deswandri, S. Santoso, Sudarno, & I. D. Irianto, “Reverse engineering program using MBSE to support development of I&C system experimental power reactor from PLC to FPGA”. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1198(2). DOI:10.1088/1742-6596/1198/2/022015
- [19] I. S. Gribkova, D. A. Gorenko “Obzor programmnogo obespecheniya dlya ispol'zovaniya BIM modelej” (in Russian) *Nauchnye trudy KubGTU, №2, 2018. C. 211-221*
- [20] Hyunsoo Lee, Woo Chang Cha “Virtual Reality-Based Ergonomic Modeling and Evaluation Framework for Nuclear Power Plant Operation and Control” *Sustainability, MDPI, Open Access Journal*, vol. 11(9), pages 1-16, May, 2019
- [21] V. S. Volodin, A. O. Tolokonskii. “Concept of instrumentation of digital twins of nuclear power plants units as observers for digital NPP I&C system”. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1391(1). DOI:10.1088/1742-6596/1391/1/012083
- [22] P. A. Bunto, V. A. Kulikov “Primenenie virtual'noy real'nosti i imitatsionnykh modelej dlya effektivnoy i bezopasnoy ekspluatatsii promyshlennykh ob'ektov” (in Russian) http://www.neolant.ru/press-center/aboutus/index.php?ELEMENT_ID=2003 (at 09.07.2021)

- [23] RASU “Virtual'naya real'nost' na sluzhbe atomu” (in Russian) <https://rasu.ru/info/news/virtualnaya-realnost-na-sluzhbe-atomu> (at 09.07.2021)
- [24] Atomnaya elektrostanciya ispol'zuet VR dlya trenirovki personala. [elektronnyj resurs]: VR Journal. – Rezhim dostupa: (in Russian) <https://vr-j.ru/news/atomnaya-elektrostantsiya-ispolzuet-vr-dlya-trenirovki-personala> (at 09.07.2021)
- [25] A. N. Feofanov, A. V. Ohmat, A. V. Berdyugin “VR/AR-tekhnologii i ih primeneniye v mashinostroenii” (in Russian) *Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proektirovanii i upravlenii. 2019. №4 (6)*
- [26] A. I. Sosnilo, M. D. Ustyuzhanina “Tekhnologii virtual'noj i dopolnennoj real'nosti kak faktory gosudarstvennoj ekonomicheskoy politiki i rosta konkurentosposobnosti biznesa” (in Russian) *Vestnik PNIPU. Social'no-ekonomicheskie nauki. 2019. №2*
- [27] O. V. Cherenko “Tekhnologii dopolnennoj i virtual'noj real'nosti v medicine: analiz konkurentnogo landshafta” *Ekonomika nauki. 2018. №1*
- [28] B. Dave, A. Buda, A. Nurminen, K. Främling “A framework for integrating BIM and IoT through open standards” (in Russian) *Automation in Construction. 95 (2018) 35–45*
- [29] W. Natephraa, A. Motamedi “Live Data Visualization of IoT Sensors Using Augmented Reality (AR) and BIM” 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019)
- [30] V.I. Romanenko, P.K. Kiryuhin, P.A. Pugachev, D.A. Homiyakov, A.A. Shcherbakov, I.M. Yushin, G.V. Tihomirov “VIRTUAL'NYE ANALOGI FIZICHESKIH STENDOV NIYAU MIFI” (in Russian) *AVTOMATIZACIYA V PROMYSHLENNOSTI 2021 № 6 33-37*
- [31] E A Dashanova, E A Zadeba, P K Kiryukhin, P A Pugachev, V I Romanenko, G V Tikhomirov, D A Khomyakov, A A Shcherbakov, I M Yushin “Development of virtual analogues of nuclear facilities in virtual reality” *Journal of Physics: Conference Series 1689 (2020) 012062 doi:10.1088/1742-6596/1689/1/012062*
- [32] Kiryukhin P., Shcherbakov A., Romanenko V., Pugachev P., Khomyakov D., Tikhomirov, G., Zadeba E. “Development of a virtual analogue of uranium-graphite subcritical assembly and visualization of the neutron flux distribution in virtual reality”. *Procedia Computer Science, 2020, 169, p. 192-197. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.135*
- [33] T. Gavrilova, O. Zhigalova “Prospects for an activity-based approach to the design and use of VR simulators in vocational training” 2021 Paper presented at the E3S Web of Conferences, 273 DOI:10.1051/e3sconf/202127312105
- [34] O. Simonova, V. Barashyan, A. Gampartsumov, M. Khlebnikova “The application of reality simulators for improving the education quality at universities”. 2021 Paper presented at the E3S Web of Conferences, 273. DOI:10.1051/e3sconf/20212731208
- [35] J. Naish, A. Burns “Minimising operator dose during JET shutdown using virtual” *Fusion Engineering and Design, 2017 124, 1215-1218 DOI:10.1016/j.fusengdes.2017.03.131*
- [36] M G Zhabitskii, V E Melnikov, O V Boyko “Complex engineering object digital twins – power engineering smart transformation basic concept” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1035 (2021) 012050 doi:10.1088/1757-899X/1035/1/012050*