

Цифровая инженерия и цифровой интеллект: подход к задаче создания малых модульных ядерных реакторов

М.Г. Жабицкий

Аннотация - В статье предложен концептуальный подход к организации цифровой инженерной деятельности при создании малых модульных ядерных реакторов. Исходной предпосылкой является возрастание сложности разработки, уровня технической неопределенности, требований безопасности, длительности жизненного цикла проектов и интенсивности технологической конкуренции, что требует изменения архитектуры инженерной деятельности. Выдвинута гипотеза об инверсии традиционного объекта разработки, согласно которой непосредственным объектом инженерной деятельности становится цифровая сущность создаваемой технической системы, тогда как физическое изделие рассматривается как ее материальное воплощение и средство последовательной верификации. Предложена архитектура, включающая две взаимосвязанные цифровые платформы: цифровую платформу проектной деятельности, предназначенную для организации коллективной инженерной работы, и платформу инженерного поиска, обеспечивающую исследование пространства технических решений на основе семейства цифровых двойников и виртуальных экспериментов. Рассмотрены принципы организации инженерной деятельности в едином цифровом пространстве, распределение функций участников проекта и роль цифрового интеллекта как нового класса интеллектуального инструментария, усиливающего возможности инженерной команды без замещения ее профессиональной ответственности. Предложенный подход рассматривается как концептуальная основа построения архитектуры проектов создания малых модульных ядерных реакторов и программа дальнейшей разработки соответствующих моделей, методов и инструментальных средств.

Ключевые слова: цифровая инженерия, цифровой интеллект, цифровая сущность, цифровой двойник, цифровая платформа, инженерная деятельность, системная инженерия, виртуальный эксперимент, верификация, малые модульные ядерные реакторы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена проблеме организации разработки прорывной сложной техники на современном этапе технологического развития. В качестве базового целевого примера рассматривается создание малых модульных ядерных реакторов для энергообеспечения удаленных территорий,

автономных промышленных объектов, центров обработки данных, транспортных систем и других потребителей, предъявляющих повышенные требования к надежности и автономности энергоснабжения.

Разработка малых модульных ядерных реакторов в последние годы стала одним из наиболее активно развивающихся направлений мировой атомной энергетики [1,2]. Проекты данного класса практически одновременно формируются и реализуются различными государствами, научными центрами и промышленными компаниями. Данная задача является чрезвычайно актуальной и для РФ [3]. При этом конкуренция разворачивается не только между отдельными проектами и национальными программами ММЯР, но и между различными технологическими парадигмами производства и накопления энергии, претендующими на решение сходных задач автономной, распределенной и низкоуглеродной энергетики.

Создание ММЯР относится к числу наиболее сложных современных инженерных задач. Оно требует согласованного применения знаний из различных предметных областей, интеграции процессов разной физической природы, разработки новых конструктивных, технологических и компоновочных решений, а также обеспечения исключительно высоких требований ядерной, радиационной и промышленной безопасности. Значительная часть ключевых решений принимается в условиях технической неопределенности, недостатка экспериментальных данных и отсутствия непосредственных аналогов создаваемой системы. Ошибки, допущенные на ранних стадиях, могут проявляться на последующих уровнях интеграции и приводить к необходимости пересмотра архитектуры изделия, программы исследований и всей траектории проекта.

Разработка осуществляется при ограниченности кадровых, финансовых и организационных ресурсов. Особое значение приобретает дефицит специалистов высокой квалификации, способных работать на стыке нескольких инженерных дисциплин, удерживать системную целостность создаваемого объекта и оценивать последствия решений за пределами собственной предметной области. Одновременно возрастают требования к интегральной эффективности

проекта, включающей достижение целевых технических характеристик, обеспечение безопасности, соблюдение сроков, рациональное использование ресурсов, экономическую целесообразность и конкурентоспособность будущего решения на всем его жизненном цикле.

Дополнительным фактором является объективно высокая инерционность атомной отрасли. Требования безопасности обуславливают необходимость многоступенчатого обоснования принимаемых решений, проведения продолжительных научно-исследовательских работ, последовательной проверки расчетных моделей, изготовления экспериментальных установок, макетов и опытных образцов, выполнения комплексных испытаний и прохождения процедур лицензирования. Поэтому цикл создания принципиально новой ядерной техники может составлять многие годы и даже десятилетия. Сокращение этого цикла за счет уменьшения объема исследований, снижения полноты проверки или ослабления требований безопасности является неприемлемым.

В то же время длительность разработки вступает в противоречие с высокой динамикой конкурентной среды. Разработчики ММЯР конкурируют между собой на уровне технических концепций, национальных программ, промышленных коопераций и предполагаемых рынков применения. Одновременно ядерные решения конкурируют с иными технологическими подходами к энергообеспечению автономных объектов, включая возобновляемую энергетику, системы накопления, гибридные энергетические комплексы и другие перспективные решения. Поэтому техническое совершенство реакторной установки само по себе еще не гарантирует востребованность создаваемого продукта: проект должен обеспечить приемлемые сроки реализации, доказанную безопасность и требуемую интегральную эффективность в сопоставлении с альтернативными способами удовлетворения исходной потребности.

Таким образом, проект создания ММЯР развивается при одновременном действии высокой научно-технической сложности, значительной неопределенности, жестких требований безопасности и нормативного регулирования, длительного жизненного цикла, дефицита квалифицированных кадров, ограниченности ресурсов и интенсивной технологической конкуренции. В этих условиях требуемый результат не может быть обеспечен только совершенствованием отдельных расчетных методов, средств проектирования или традиционных процедур управления. Возникает необходимость изменения самой архитектуры инженерной деятельности по созданию принципиально новой сложной техники.

В связи с этим в настоящей работе исследуется возможность построения архитектуры инженерной деятельности, соответствующей современному уровню развития средств цифрового моделирования, виртуальных экспериментов и цифрового интеллекта. Исходная гипотеза состоит в том, что качественное изменение должно затрагивать не только используемые

инструменты, но также основной объект разработки, организацию совместной деятельности и взаимодействие цифровых и физических компонентов создаваемой системы.

Объектом исследования является процесс создания прорывной сложной техники.

Предметом исследования является архитектура инженерной деятельности по созданию прорывной сложной техники на современном этапе технологического развития.

Цель работы состоит в разработке концептуальной модели архитектуры инженерной деятельности, основанной на формировании и последовательной верификации цифровой сущности будущей техники, а также на взаимодействии двух классов цифровых двойников - цифрового двойника проекта и семейства цифровых двойников изделия.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в инверсии традиционного отношения между физическим изделием и его цифровым представлением. В качестве непосредственного объекта инженерной разработки предлагается рассматривать цифровую сущность будущей технической системы, тогда как физическое изделие выступает ее материальным воплощением и средством системной проверки. Цифровое сопровождение при этом разделяется на два взаимосвязанных контура: цифровой двойник проекта предназначен для организации и управления совместной деятельностью участников, а семейство цифровых двойников изделия - для поиска, исследования, обоснования и выбора допустимых и предпочтительных технических решений.

Предлагаемый подход носит характер исследовательской гипотезы и не претендует на завершённую методологию организации инженерной деятельности. Его назначение состоит в формировании концептуальной основы для последующей разработки моделей, методов и инструментальных средств цифрового сопровождения создания прорывной сложной техники. При этом рассматриваемая концепция не является футурологическим предположением или отвлеченной академической конструкцией: она предлагается в качестве рабочей основы организации практической деятельности в проекте создания малых модульных ядерных реакторов и должна последовательно уточняться и проверяться по мере выполнения реальных исследовательских и инженерных работ.

II. ЦИФРОВАЯ СУЩНОСТЬ КАК ОСНОВНОЙ ОБЪЕКТ ИНЖЕНЕРНОЙ РАЗРАБОТКИ

На протяжении длительной истории развития техники целью, непосредственным результатом и продуктом инженерной деятельности являлось создание материального изделия, удовлетворяющего определенной общественной или производственной потребности. Независимо от уровня развития науки и используемых инструментов проектирование, расчеты, моделирование и испытания рассматривались как

средства достижения этой цели, тогда как объектом разработки оставалась будущая физическая система.

Развитие цифрового моделирования, вычислительных методов, технологий искусственного интеллекта и современных средств обработки инженерных знаний создает возможность качественного изменения данной архитектуры [4]. Основная часть инженерного поиска, анализа альтернатив и проверки принимаемых решений может быть перенесена в цифровую среду еще до создания физического объекта.

В настоящей работе выдвигается гипотеза, согласно которой на современном этапе технологического развития непосредственным объектом инженерной разработки становится не физическое изделие, а его цифровая сущность. Такой подход соответствует современным методологическим подходам [5].

Под цифровой сущностью понимается имеющая цифровую форму развивающаяся совокупность взаимосвязанных требований, инженерных решений, математических моделей, расчетных результатов, пространственных компоновок, экспериментальных данных, ограничений, обоснований и накопленных знаний, соответствующих создаваемой технической системе и ее предполагаемому поведению в рамках процесса разработки и на последующих стадиях

жизненного цикла, включая варианты и поколения реализации.

Предлагаемая архитектура инженерной деятельности приведена на рис. 1.

В отличие от традиционной схемы, в которой цифровой двойник формируется как отражение уже созданного физического изделия, предлагаемый подход предполагает обратную последовательность. Первичным объектом разработки становится цифровая сущность будущей технической системы. Именно она проходит последовательное развитие, уточнение и исследование, тогда как физическое изделие создается как ее материальное воплощение.

При этом цифровая сущность не формируется однократно. Ее развитие представляет собой непрерывный итерационный процесс, объединяющий разработку моделей, накопление инженерных знаний, анализ результатов и их последовательную верификацию.

Поэтому на рис. 1 процессы формирования и верификации цифровой сущности объединены в единый циклический контур. Каждая новая версия цифровой сущности становится основанием для последующих исследований, а результаты исследований, в свою очередь, используются для ее дальнейшего уточнения.



Рис. 1. Инверсия объекта и центра инженерной деятельности при переходе к современной архитектуре разработки.

Принципиально важным является то обстоятельство, что перенос инженерной деятельности в цифровую среду не означает отказа от классического

научного метода. Любая цифровая сущность представляет собой инженерную гипотезу о будущем поведении создаваемой технической системы, ее

отражением в цифровой среде на уровне текущего понимания разработчиков. Следовательно, ее развитие невозможно без непрерывной проверки соответствия объективной реальности.

Верификация цифровой сущности является обязательным и непрерывным процессом, сопровождающим все стадии разработки. Базой верификации являются результаты физических экспериментов, исследования отдельных компонентов, стендовые испытания, испытания подсистем, экспериментальных установок и опытных образцов, а на последующих этапах - данные эксплуатации реальной технической системы. Таким образом, предметом верификации является не программная реализация цифровой сущности как таковая, а степень соответствия ее поведения поведению будущего физического изделия.

По мере накопления экспериментально подтвержденных знаний область доверия к цифровой сущности расширяется. Это позволяет использовать ее для проведения виртуальных экспериментов, исследования альтернативных технических решений, анализа различных компоновок, проверки инженерных гипотез и выбора перспективных направлений разработки. Следовательно, виртуальные эксперименты не заменяют физические исследования, а позволяют существенно сократить пространство поиска, концентрируя дорогостоящие экспериментальные работы на наиболее перспективных вариантах технических решений.

После достижения требуемой степени обоснованности, комплексности и детализации цифровой сущности осуществляется ее материализация в виде физической технической системы. В предлагаемой архитектуре физическое изделие перестает быть единственным центром инженерной деятельности и одновременно приобретает две функции. С одной стороны, оно представляет собой материальное воплощение сформированной цифровой сущности. С другой стороны, результаты его испытаний и эксплуатации становятся источником новых знаний, обеспечивающих дальнейшее развитие и уточнение цифровой сущности.

Таким образом, предлагаемая архитектура не противопоставляет цифровое моделирование и классическую инженерную деятельность. Напротив, она сохраняет фундаментальные принципы научного метода, основанные на экспериментальной проверке инженерных гипотез, однако переносит основной инженерный поиск в цифровую среду. В результате объектом разработки становится цифровая сущность будущей технической системы, а физическое изделие - ее материальным воплощением и одновременно основным средством системной верификации.

III. ЦИФРОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В процессе создания прорывной сложной техники цифровому сопровождению подлежит не только создаваемое изделие, но и сама деятельность по его

созданию. Следовательно, в современной архитектуре инженерной деятельности возникают два качественно различных объекта цифровизации: проект создания новой техники и создаваемая техническая система.

Несмотря на общность термина «цифровой двойник», эти объекты имеют различную природу, назначение и требуют различных инструментальных средств реализации. В первом случае объектом цифрового представления является проект как организационная система, а целью - организация и управление совместной инженерной деятельностью. Во втором случае объектом цифрового представления является физическая техническая система, представленная цифровой сущностью и семейством цифровых двойников вариантов и поколений изделия, а целью - исследование пространства технических решений на базе последовательно верифицируемого семейства цифровых двойников и выбор технических решений путем проведения виртуальных экспериментов и анализа совокупности их результатов. Поэтому далее рассматриваются две самостоятельные цифровые платформы инженерной деятельности в проекте: цифровой двойник проекта и семейство цифровых двойников изделия.

3.1. Цифровой двойник проекта

Проект создания прорывной сложной техники представляет собой самостоятельную организационную систему, включающую множество участников, организаций, ролей, процессов и принимаемых решений. Наряду с разработкой технической системы осуществляется организация совместной инженерной деятельности, распределение ответственности, координация работ, согласование решений, накопление доказательной базы и управление развитием проекта. Следовательно, проект сам становится самостоятельным объектом цифрового представления.

Целью цифрового двойника проекта является формирование единого информационного пространства, обеспечивающего организацию и сопровождение совместной деятельности всех участников проекта. В отличие от цифровых моделей изделия, цифровой двойник проекта ориентирован не на описание физических свойств создаваемой технической системы, а на описание процессов ее создания. Его назначение заключается в обеспечении согласованного взаимодействия участников проекта независимо от их предметной специализации, организационной принадлежности и стадии жизненного цикла разработки.

В цифровом двойнике проекта формализуются структура проекта, роли участников, распределение ответственности, требования, архитектура проекта, коммуникации между организациями и исполнителями, принимаемые решения, технические разработки, планы работ, результаты верификации, а также основания принятия инженерных решений. Это обеспечивает прослеживаемость взаимосвязей между целями проекта, действиями участников и получаемыми результатами, а также прозрачность

процессов принятия решений на протяжении всего жизненного цикла разработки.

Поскольку объектом цифровизации является деятельность, инструментальная основа цифрового двойника проекта существенно отличается от инструментов цифрового моделирования изделия. Она включает средства управления требованиями, архитектурой проекта, конфигурацией, знаниями, коммуникациями, коллективной разработкой и поддержкой принятия решений. Тем самым цифровой двойник проекта представляет собой информационно-аналитическую платформу организации инженерной деятельности, обеспечивающую интеграцию участников проекта в единое информационное пространство и сохранение системной целостности разработки при ее последовательном развитии.

3.2. Платформа инженерного поиска

Вторым контуром цифрового сопровождения создания прорывной сложной техники является платформа инженерного поиска, предназначенная для формирования, развития и исследования семейства цифровых двойников вариантов создаваемой технической системы.

В отличие от цифрового двойника проекта, объектом которого является деятельность по созданию

новой техники, объектом данной платформы является сама техническая система во множестве возможных вариантов реализации. На ранних этапах разработки принципиально новой техники отсутствует единственное сформированное изделие: рассматриваются различные архитектуры, функциональные схемы, конструктивные решения, варианты реализации отдельных компонентов и подсистем. Поэтому цифровое сопровождение должно обеспечивать не описание одного заранее определенного объекта, а поддержку пространства инженерных решений.

На рис. 2 представлена архитектура платформы инженерного поиска.

Основу платформы составляет многоуровневое представление создаваемой технической системы, включающее модели различных уровней абстракции и детализации. К ним относятся функциональные модели, архитектурные модели, структурные модели, физические модели, балансовые модели, позиционные модели, интеграционные модели системы – подсистемы – компоненты и модели надежности, безопасности, эксплуатации и др.



Рис. 2. Платформа инженерного поиска: многоуровневая интеграция моделей, внешних инструментов и семейства цифровых двойников вариантов создаваемой технической системы

Каждый уровень описания решает собственный класс инженерных задач и может использовать специализированные методы и инструменты моделирования. Функциональные и архитектурные модели обеспечивают описание назначения системы, состава функций и распределения требований. Структурные модели определяют состав элементов и взаимосвязи между ними. Физические модели позволяют исследовать процессы различной природы, включая теплофизические, нейтронно-физические, прочностные и другие явления. Балансовые и динамические модели обеспечивают анализ поведения системы во времени и при различных режимах функционирования. Интеграционные модели обеспечивают представление системы как совокупности взаимодействующих уровней - система, подсистемы, компоненты. Принципиальным свойством платформы является то, что она не ограничивается построением единой универсальной модели технической системы. Такой подход уже рассматривался авторами в работе [6]. Создание сложной техники требует совместного использования множества специализированных моделей, каждая из которых обладает собственной областью применимости, уровнем детализации и методическим аппаратом. Поэтому основной задачей платформы является не замена существующих инженерных средств, а обеспечение их интеграции в едином цифровом пространстве разработки.

Открытая архитектура платформы позволяет подключать внешние инструменты, расчетные комплексы, библиотеки моделей, специализированное программное обеспечение и интеллектуальные модули анализа. При этом интеграция осуществляется не путем принудительного объединения всех средств в единую систему моделирования, а через согласованные механизмы взаимодействия: интерфейсы интеграции, обмен инженерными данными, управление версиями и конфигурациями, а также использование общего семантического пространства.

Такой подход позволяет сохранить преимущества специализированных инженерных инструментов и одновременно обеспечить их совместное применение в рамках единой архитектуры. Например, расчетные модели различных физических процессов могут разрабатываться и верифицироваться средствами, наиболее подходящими для соответствующей предметной области, но результаты их работы могут использоваться совместно при анализе вариантов технических решений.

Одним из ключевых свойств платформы является поддержка многовариантного инженерного поиска. Семейство цифровых двойников позволяет одновременно рассматривать несколько альтернативных конфигураций создаваемой системы, выполнять виртуальные эксперименты, сравнивать результаты моделирования и анализировать технические развилки. По мере накопления расчетных и экспериментальных данных пространство

возможных решений последовательно сокращается, а уровень доверия к отдельным цифровым сущностям возрастает.

При этом цифровые модели не являются самостоятельным источником инженерной истины. Каждая цифровая сущность развивается в рамках цикла формирования, исследования и верификации. Результаты виртуальных экспериментов используются для выбора наиболее перспективных решений, а результаты физических экспериментов, испытаний компонентов, подсистем и опытных образцов - для проверки и уточнения моделей.

Таким образом, платформа инженерного поиска представляет собой открытую многоуровневую интеграционную среду, обеспечивающую совместное развитие семейства цифровых двойников различных вариантов и поколений создаваемой техники. Ее назначение состоит не в создании единственной цифровой копии будущего изделия, а в организации процесса инженерного поиска, позволяющего обосновать выбор технического решения для последующей материализации.

IV. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ

Представленные выше платформы не являются самостоятельными информационными системами, функционирующими независимо друг от друга. Напротив, их совместная работа образует единый контур управления инженерной разработкой, в котором цифровая платформа проектной деятельности и платформа инженерного поиска непрерывно обмениваются целями, ограничениями, результатами исследований и накопленными инженерными знаниями (рис. 3).

Исходным источником развития проекта являются потребности в создаваемом продукте и системе. Они определяют назначение разрабатываемой техники, целевые характеристики, требования безопасности, ресурсные ограничения и нормативные условия реализации проекта. Одновременно, формирование этих потребностей происходит под воздействием конкурентной среды, определяющей новые вызовы, альтернативные технические решения и изменение требований рынка, а также профессионального пространства. Цифровая платформа проектной деятельности преобразует внешние требования в конкретные инженерные задачи. Она определяет направления инженерного поиска, формирует перечень критических неопределенностей, устанавливает приоритеты исследований и определяет, какие технические гипотезы требуют проверки, какие модели необходимо уточнить и какие виртуальные или физические эксперименты должны быть выполнены. Таким образом, объектом управления становится не только выполнение календарного плана проекта, но и последовательное снижение инженерной неопределенности.



Рис. 3. Взаимодействие цифровой платформы проектной деятельности и платформы инженерного поиска в замкнутом контуре управления инженерной разработкой

Полученные задания поступают в платформу инженерного поиска, в которой осуществляется исследование пространства технических решений на основе семейства цифровых двойников изделия. Здесь выполняются виртуальные эксперименты, анализируются альтернативные варианты реализации, интегрируются результаты специализированных инженерных моделей и формируются новые знания о свойствах создаваемой технической системы. Одновременно осуществляется последовательная верификация цифровых сущностей путем сопоставления результатов моделирования с экспериментальными исследованиями и испытаниями по мере их появления.

Результатом функционирования платформы инженерного поиска являются не только новые варианты технических решений. В цифровую платформу проектной деятельности возвращаются подтвержденные инженерные знания, выявленные ограничения, оценки зрелости отдельных решений, результаты виртуальных и физических экспериментов, а также рекомендации по дальнейшему развитию проекта. Эта информация может приводить к корректировке целей отдельных этапов, изменению последовательности работ, пересмотру технических разлоков и уточнению требований к создаваемой системе.

Таким образом, взаимодействие двух платформ формирует замкнутый контур управления инженерной разработкой. В отличие от традиционного подхода, в котором проект управляет преимущественно

выполнением заранее определенного набора работ, предлагаемая архитектура обеспечивает непрерывное управление процессом формирования, проверки и использования инженерных знаний, необходимых для выбора технического решения. Именно непрерывный обмен между цифровой платформой проектной деятельности и платформой инженерного поиска обеспечивает адаптивное развитие проекта в условиях высокой технической неопределенности, изменения внешних требований и постоянного развития профессионального научно-технического пространства.

V. ОРГАНИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В НОВОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Инверсия объекта инженерной деятельности неизбежно приводит к изменению организации совместной работы участников проекта [7]. Если в традиционной архитектуре взаимодействие специалистов строится преимущественно вокруг отдельных документов, этапов проектирования, расчетных моделей или элементов создаваемого изделия, то в предлагаемом подходе общим объектом коллективной деятельности становится цифровая сущность будущей технической системы. Именно ее формирование, развитие, согласование и последовательная верификация объединяют работу участников проекта независимо от их предметной специализации и организационной принадлежности.

Совместная инженерная деятельность осуществляется в едином цифровом информационном

пространстве, формируемом цифровой платформой проектной деятельности и платформой инженерного поиска. Участники получают доступ к актуальному состоянию потребностей и требований, моделей и технических решений, расчетных и экспериментальных результатов, выявленных ограничений, принятых решений и оснований их принятия. Цифровые коммуникации обеспечивают оперативное обсуждение изменений, согласование междисциплинарных решений, прослеживаемость ответственности и сохранение истории развития цифровой сущности.

Единое цифровое пространство не предполагает унификации профессионального инструментария. Специалисты продолжают применять привычные и наиболее эффективные для своей предметной области системы проектирования, расчетные комплексы, библиотеки моделей, экспериментальные средства и программные среды анализа данных. Их включение в общую деятельность обеспечивается открытой архитектурой интеграционных платформ, согласованными интерфейсами, взаимодействием через инженерные данные и единым семантическим пространством. Тем самым интегрируются не только результаты работы, но и различные профессиональные способы представления и исследования создаваемой системы.

В новой архитектуре можно выделить основные группы профессиональных компетенций:

- **научно-методическое руководство** - формирование научных гипотез, определение направлений исследований, обеспечение научной состоятельности решений и организация верификации цифровой сущности;
- **системная инженерия и архитектура** - формирование целостного представления создаваемой системы, согласование решений различных предметных областей, сопровождение технических разлоков и сохранение архитектурной целостности;
- **управление проектом** - организация совместной деятельности, координация участников и организаций, управление траекторией проекта, ресурсами, сроками и приоритетами инженерного поиска;
- **специализированные группы по предметным компетенциям** - разработка и верификация функциональных, конструктивных, технологических и физических моделей, проведение профильных расчетов и формирование решений в соответствующих областях;
- **экспериментальные и испытательные подразделения** - проведение исследований и испытаний, получение доказательной базы, проверка моделей и расширение области доверия к цифровой сущности;
- **группы цифровой интеграции и сопровождения** - обеспечение совместимости инструментов, данных и моделей, управление конфигурациями, поддержание цифровой

инфраструктуры и доступности единого информационного пространства.

Наряду с профессиональной структурой в проекте реализуется совокупность сквозных функциональных направлений, связывающих деятельность различных групп компетенций:

- **выявление и уточнение потребностей** в создаваемом продукте и системе, включая анализ назначения, условий применения и критериев востребованности;
- **мониторинг конкурентной среды и технологических возможностей**, включая анализ альтернативных решений, профессионального опыта, научно-технических достижений и изменений внешних условий;
- **формирование и управление требованиями**, обеспечение их непротиворечивости, прослеживаемости и связи с архитектурой, моделями, испытаниями и принимаемыми решениями;
- **управление инженерным поиском**, включая постановку исследовательских задач, выбор неопределенностей, подлежащих снятию, и определение необходимых виртуальных и физических экспериментов;
- **управление ресурсами и временем**, согласование программы исследований и разработки с доступными кадровыми, финансовыми, экспериментальными и организационными возможностями;
- **управление техническими развилками и изменениями**, сравнительный анализ вариантов, фиксация оснований выбора и оценка последствий принятых решений;
- **управление рисками, несоответствиями и ограничениями**, их выявление, регистрация, анализ влияния и контроль устранения либо обоснованного принятия;
- **верификация и управление доказательной базой**, связывающие инженерные гипотезы и модели с результатами расчетов, экспериментов, испытаний и последующей эксплуатации;
- **управление конфигурацией и зрелостью цифровой сущности**, обеспечивающее согласованность ее версий, моделей, данных и уровней готовности технических решений.

Профессиональные группы и функциональные направления не образуют двух независимых структур. Каждая функция реализуется совместно несколькими группами компетенций, а каждая группа участвует одновременно в нескольких сквозных процессах. Например, управление требованиями объединяет проектное управление, системную инженерию и предметных специалистов; работа с несоответствиями требует участия разработчиков, испытателей и руководителей технических направлений; мониторинг технологических возможностей связывает научное руководство, предметные группы и платформу инженерного поиска.

Таким образом, предлагаемая архитектура изменяет не профессиональную природу инженерной деятельности, а способ ее организации. Специалисты сохраняют собственные компетенции, ответственность и инструментарий, но работают в едином цифровом пространстве над общей развивающейся цифровой сущностью. Профессиональная структура обеспечивает глубину и достоверность инженерного знания, а сквозные функциональные направления - целостность и непрерывность процесса его преобразования в обоснованное техническое решение.

VI. КОЛЛАБОРАЦИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЦИФРОВОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Предлагаемая архитектура инженерной деятельности не предполагает появления нового субъекта в проекте. Во всех рассмотренных контурах инженерной деятельности субъектом постановки целей, научной интерпретации результатов, принятия инженерных решений и профессиональной ответственности остается человек. В этих условиях цифровой интеллект рассматривается не как самостоятельный разработчик, а как новый класс интеллектуального инструментария, предназначенного для усиления интеллектуальной деятельности инженерной команды.

Подобно тому как предыдущие поколения инженерного инструментария последовательно расширяли физические, вычислительные и информационные возможности специалистов, цифровой интеллект расширяет возможности человека при анализе сложных взаимосвязей, исследовании пространства технических решений, обработке больших объемов инженерной информации и интеллектуальной поддержке принятия решений [8]. Его применение не изменяет дополнительно к ранее обсужденному архитектуру инженерной деятельности, но позволяет существенно повысить производительность интеллектуального труда, широту инженерного поиска, масштаб одновременно рассматриваемых вариантов и качество инженерного анализа.

В цифровой платформе проектной деятельности цифровой интеллект выполняет функции интеллектуального ассистента управления инженерной разработкой. Его применение ориентировано на анализ взаимосвязей между требованиями, моделями и инженерными решениями, выявление противоречий и несогласованностей, оценку последствий принимаемых решений, контроль полноты проектной информации, поддержку управления требованиями, изменениями и зрелостью проекта, поддержание целостности и прозрачности информационного пространства. Получаемые результаты используются специалистами при организации проекта, однако постановка задач, выбор направлений развития и принятие управленческих решений сохраняются за человеком.

В платформе инженерного поиска цифровой интеллект используется как средство усиления

исследовательской деятельности специалистов [9]. Он обеспечивает интеллектуальную поддержку исследования пространства технических решений, построение приближенных и суррогатных моделей, анализ результатов виртуальных экспериментов, многокритериальное сравнение альтернативных вариантов и выявление перспективных направлений дальнейших исследований. При этом результаты интеллектуального анализа рассматриваются как дополнительная инженерная информация, требующая профессиональной интерпретации и последующей верификации специалистами.

Таким образом, цифровой интеллект интегрируется в оба контура инженерной деятельности как новый класс интеллектуального инструментария, обеспечивающего коллаборацию с человеком при организации проекта и исследовании создаваемой технической системы. Его назначение состоит не в замещении инженерной команды, а в многократном повышении эффективности интеллектуальной деятельности специалистов. Постановка целей, научная интерпретация результатов, принятие инженерных решений и ответственность за их последствия на всех этапах разработки сохраняются за человеком. Именно человек, обладая профессиональными знаниями, инженерной интуицией и ответственностью за создаваемую технику, остается центральным субъектом современной инженерной деятельности, тогда как цифровой интеллект становится новым классом ее интеллектуального инструментария. При этом на практике происходит кратное повышение производительности интеллектуального труда.

VII. АРХИТЕКТУРА ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ МАЛОГО МОДУЛЬНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Применительно к проекту создания малого модульного ядерного реактора предложенная архитектура определяет практическую программу организации исследований, проектирования, расчетного и экспериментального обоснования принимаемых решений. Речь идет не о внедрении отдельных цифровых технологий, а о формировании целостного проектного пространства, объединяющего инженерную команду, цифровую платформу проектной деятельности, платформу инженерного поиска и последовательно верифицируемую цифровую сущность реакторной установки.

Проект создания малого модульного ядерного реактора требует согласованного решения широкого комплекса взаимосвязанных инженерных задач, включающих нейтронно-физическое и теплогидравлическое обоснование активной зоны, анализ теплообмена и гидродинамических режимов, прочностное обоснование оборудования и трубопроводов, обеспечение ресурса и надежности оборудования, разработку систем управления и защиты, анализ безопасности ядерно-физических установок с высокой автономностью и длительной работой в необслуживаемом режиме, обоснование

ядерной и радиационной безопасности, экспериментальную квалификацию оборудования и подтверждение соответствия требованиям нормативной документации. Каждое из указанных направлений обладает собственными расчетными методами, специализированными программными комплексами, экспериментальной базой и профессиональными инженерными коллективами. Поэтому ключевой задачей становится не замена сложившихся инженерных технологий, а организация их совместной работы в рамках единой цифровой архитектуры проекта.

В предлагаемой архитектуре можно выделить следующие взаимосвязанные составляющие.

Цифровая сущность реакторной установки. Она должна объединять архитектурное описание, функциональные и конструктивные решения, требования к системам и оборудованию, математические модели физических процессов, результаты расчетного обоснования, экспериментальные данные, ограничения применимости моделей и историю принятых инженерных решений. Именно цифровая сущность становится единым объектом проектирования, исследования и последовательной верификации на протяжении всего проекта.

Цифровая платформа проектной деятельности. Ее назначение состоит в организации взаимодействия участников проекта, управлении требованиями, конфигурацией, изменениями, техническими развилками, сроками, ресурсами, рисками и несоответствиями. Платформа обеспечивает сквозную прослеживаемость инженерной деятельности - от исходных требований до проектных решений, расчетов, испытаний и материалов обоснования безопасности.

Платформа инженерного поиска. Она предназначена для формирования и развития семейства цифровых двойников реакторной установки, исследования альтернативных технических решений, проведения виртуальных экспериментов и последовательного сокращения пространства проектных альтернатив. В ее состав интегрируются специализированные расчетные коды, математические модели и инженерные библиотеки, используемые для нейтронно-физического, теплогидравлического, прочностного, динамического и других видов анализа.

Комплексная верификация цифровой сущности. Верификация должна осуществляться последовательно на всех уровнях детализации - от отдельных физических моделей и компонентов до подсистем и реакторной установки в целом. При этом результаты численного моделирования, расчетного обоснования, стендовых исследований, квалификационных испытаний и натурных экспериментов формируют единую доказательную базу, обеспечивающую повышение достоверности цифровой сущности и обоснованности принимаемых инженерных решений.

Организация коллективной инженерной деятельности. Работа научного руководителя,

главного конструктора, руководителей предметных направлений, специалистов по физике реактора, теплогидравлике, прочности, системам управления и защиты, безопасности, материаловедению, технологии изготовления и испытаниям осуществляется в едином цифровом информационном пространстве. Такое пространство обеспечивает цифровые коммуникации, совместную работу над цифровой сущностью, управление требованиями, конфигурацией и изменениями, прослеживаемость инженерных решений и формирование единой доказательной базы проекта.

Интеллектуальный инструментарий проекта. Цифровой интеллект интегрируется в обе платформы как новый класс интеллектуального инструментария инженерной деятельности. В проектном контуре он используется для анализа взаимосвязей между требованиями, инженерными решениями и результатами работ, выявления противоречий, оценки последствий изменений и контроля полноты проектной информации. В контуре инженерного поиска он обеспечивает интеллектуальную поддержку исследования пространства технических решений, анализа результатов виртуальных экспериментов, построения приближенных моделей и многокритериального сравнения альтернативных вариантов. При этом постановка целей, принятие инженерных решений, научная интерпретация результатов и профессиональная ответственность полностью сохраняются за инженерной командой.

Таким образом, предложенная архитектура определяет практическую программу организации проекта создания малого модульного ядерного реактора. Ее реализация предполагает последовательное формирование цифровой сущности реакторной установки, развитие двух взаимосвязанных цифровых платформ, создание методов комплексной верификации, организацию коллективной инженерной деятельности в едином цифровом пространстве и интеграцию цифрового интеллекта как нового класса интеллектуального инструментария. Именно совокупность этих направлений образует основу современной архитектуры проекта создания малых модульных ядерных реакторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный подход предлагается рассматривать как формат организации конкретной программы работ в проекте создания малого модульного ядерного реактора. Ее практическая ценность может быть подтверждена только в ходе реальной совместной деятельности проектных, научных, расчетных и экспериментальных коллективов, когда цифровая сущность реакторной установки, две взаимосвязанные цифровые платформы и механизмы коллаборации человека с цифровым интеллектом будут последовательно реализовываться, уточняться и проверяться на инженерных задачах проекта.

Ближайший этап должен быть связан с проработкой минимально работоспособной архитектуры

проектного пространства. Принципиально важно начинать не с попытки детально охватить все аспекты проект, а с ограниченного числа критических инженерных задач интегрированных на базе прототипов цифровых платформ, для которых могут быть построены сквозные цепочки от постановки неопределенности до виртуального или физического эксперимента, получения нового знания и изменения траектории разработки.

Следующим шагом должно быть формирование и апробация методики последовательной верификации цифровой сущности. Такая методика должна определять уровни доверия к моделям и результатам, правила включения расчетных и экспериментальных данных в доказательную базу, критерии зрелости технических решений и условия перехода к следующему уровню интеграции. Именно качество этой доказательной системы, а не количество созданных цифровых моделей, должно стать главным критерием состоятельности предлагаемой архитектуры.

Параллельно требуется разработка организационного и нормативного контура деятельности в проекте: распределение ответственности между научным руководством, главным конструктором, проектным управлением и предметными коллективами; регламентация цифровых коммуникаций; правила изменения и согласования цифровой сущности; требования к прослеживаемости решений; границы применения цифрового интеллекта и порядок профессиональной проверки формируемых им результатов. Новая архитектура не отменяет сложившуюся систему инженерной ответственности, а требует ее более точного и прозрачного закрепления в цифровой среде.

Результатом работ должна стать не отдельная информационная система и не совокупность цифровых моделей, а воспроизводимая технология организации проекта создания малого модульного ядерного реактора. Ее целевой эффект состоит в повышении производительности инженерной команды, прогнозируемом управлении временем и ресурсами, управляемом сокращении пространства технических решений и концентрации расчетных и экспериментальных ресурсов на наиболее обоснованных вариантах без снижения требований к безопасности и полноте верификации.

Тем самым настоящая работа формулирует исходную гипотезу и программу ее практической проверки. Следующий этап состоит в переходе от концептуальной архитектуры к ее реализации в конкретном проекте, последовательному накоплению доказательств работоспособности предложенного подхода и его корректировке по результатам реальной инженерной деятельности.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] International Energy Agency. The Path to a New Era for Nuclear Energy. Paris: IEA, 2025.
- [2] Prospects and Trends in the Development of Small Modular Nuclear Reactors // *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 22. Art. 5970. DOI: 10.3390/en18225970.

[3] Алексей Лихачев. Fresh look needed at licensing approach for small reactors. 2026.

[4] U.S. Department of Defense. Digital Engineering Strategy. Washington, DC: Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense for Systems Engineering, 2018.

[5] Huang J., Gheorghe A., Handley H., Pazos P., Pinto A., Kovacic S., et al. Towards Digital Engineering: The Advent of Digital Systems Engineering // *International Journal of System of Systems Engineering*. 2020. Vol. 10, No. 3. P. 234–261. DOI: 10.1504/IJSSE.2020.109737.

[6] М.Г.Жабицкий, Ю.А.Андрюченко, Ю.Н.Конев, Г.В. Свездик, В.Н. Малышев Концепция инструментов цифрового моделирования комплексных технологий на полном жизненном цикле инновационных производств *International Journal of Open Information Technologies* ISSN: 2307-8162 vol. 13, no. 8, 2025

[7] Xames M. D., Topcu T. G. Digital Engineering Transformation as a Sociotechnical Challenge: Categorization of Barriers and Their Mapping to DoD's Policy Goals // *Systems Engineering*. - 2026. - P. 1–20. - DOI: 10.1002/sys.70059.

[8] Bubeck S., Coester C., Eldan R., et al. Early Science Acceleration Experiments with GPT-5. - 2025. - arXiv:2511.16072.

[9] Altun O., Ott M., Meihufener N., Budde F., Mozgova I. Leveraging Large Language Models in Engineering Design and Product Development: A Snapshot // *Procedia Computer Science*. - 2026. - Vol. 276. - P. 344–353.

Статья получена 03 июля 2026

Жабицкий М.Г. - заместитель директора ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: jabitsky@mail.ru);

Digital Engineering and Digital Intelligence: An Approach to the Development of Small Modular Nuclear Reactors

M.G. Zhabitskii

Abstract—The paper proposes a conceptual approach to organizing digital engineering for the development of small modular nuclear reactors. The proposed approach is motivated by the increasing complexity of engineering design, high levels of technical uncertainty, stringent safety requirements, long project life cycles, and intensifying technological competition, all of which necessitate a fundamental transformation of engineering practice. The central hypothesis is an inversion of the traditional development paradigm, whereby the primary object of engineering activity becomes the digital entity of the future technical system, while the physical product serves as its material embodiment and the principal means of sequential verification. The proposed architecture comprises two interconnected digital platforms: a project digital platform supporting the organization and coordination of collaborative engineering activities, and an engineering exploration platform enabling systematic investigation of the design space through a family of digital twins and virtual experiments. The paper also discusses principles for organizing collaborative engineering within a unified digital environment, the distribution of roles and responsibilities among project participants, and the role of digital intelligence as a new class of intellectual engineering tools that enhances human capabilities without replacing professional responsibility. The proposed approach is intended as a conceptual foundation for the architecture of small modular nuclear reactor development projects and as a basis for the subsequent development of corresponding models, methods, and software tools.

Keywords—digital engineering, digital intelligence, digital entity, digital project platform, engineering exploration platform, digital twin, systems engineering, virtual experiments, verification, small modular nuclear reactors.

REFERENCES

- [1] International Energy Agency. The Path to a New Era for Nuclear Energy. Paris: IEA, 2025.
- [2] Prospects and Trends in the Development of Small Modular Nuclear Reactors // *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 22. Art. 5970. DOI: 10.3390/en18225970.
- [3] Likhachev A. Fresh look needed at licensing approach for small reactors. 2026.
- [4] U.S. Department of Defense. Digital Engineering Strategy. Washington, DC: Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense for Systems Engineering, 2018.
- [5] Huang J., Gheorghe A., Handley H., Pazos P., Pinto A., Kovacic S., et al. Towards Digital Engineering: The Advent of Digital Systems Engineering // *International Journal of System of Systems Engineering*. 2020. Vol. 10, No. 3. P. 234–261. DOI: 10.1504/IJSSE.2020.109737.
- [6] M.G. Zhabitskii, Yu.A. Andrienko, Yu.N. Konev, G.V. Sverdlik, V.N. Malyshev Complex digital modeling tools concept for the innovative industries technologies life cycle *International Journal of Open Information Technologies* ISSN: 2307-8162 vol. 13, no. 8, 2025
- [7] Xames M. D., Topcu T. G. Digital Engineering Transformation as a Sociotechnical Challenge: Categorization of Barriers and Their Mapping to DoD's Policy Goals // *Systems Engineering*. - 2026. - P. 1–20. - DOI: 10.1002/sys.70059.
- [8] Bubeck S., Coester C., Eldan R., et al. Early Science Acceleration Experiments with GPT-5. - 2025. - arXiv:2511.16072.
- [9] Altun O., Ott M., Meinhöfener N., Budde F., Mozgova I. Leveraging Large Language Models in Engineering Design and Product Development: A Snapshot // *Procedia Computer Science*. - 2026. - Vol. 276. - P. 344–353.