

Цифровая трансформация исследовательской, проектной и производственной деятельности в химических технологиях

О. И. Седяров*, Е. В. Отрубянников*,¹, П. А. Пустовойт*, А. И. Польгуев*

**Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия*

Аннотация

В работе рассмотрены современные подходы к цифровой трансформации производственного процесса. Отмечена слабая цифровизация химической отрасли. Обосновывается потребность в едином рассмотрении исследовательской, проектной и производственной деятельности. Предложены три этапа цифровой трансформации, каждый из которых дополняет предыдущий. На первом этапе создается модель, которая аккумулирует информацию о реальном объекте или процессе, актуализация которой выполняется вручную. На втором этапе происходит формирование единого информационного поля за счёт использования цифровых нитей. Происходит связывание цифровой составляющей объекта или процесса с понятием жизненного цикла. Цифровые нити приобретают автономность. Результатом второго этапа цифровой трансформации можно признать появление цифровых двойников. На третьем этапе цифровой трансформации происходит переосмысление цифрового двойника как информационной системы, что позволяет посмотреть на жизненный цикл продукта в контексте модельно-ориентированного проектирования. Модельно-ориентированный подход расширяет возможности по управлению эволюцией системы за счёт использования практик, применимых к информационным системам.

Ключевые слова

Цифровая трансформация, химическая технология, цифровой двойник, модельно-ориентированное проектирование.

Введение

В современном мире цифровизация и цифровая трансформация считаются критически важными для любых производственных предприятий. Они помогают повысить конкурентоспособность и адаптироваться к изменяющимся условиям рынка. Пандемия COVID-19 подчеркнула значимость цифровых технологий, поскольку они позволяют предприятиям

функционировать даже в экстремальных условиях. Опрос химических компаний после пандемии показал увеличение количества проектов цифровизации на 12% [1], что чаще всего связано с нарушением цепочек сбыта и поставок. Несмотря на это большинство руководителей химических производств, опрошенных в рамках исследования [2], отметили низкий уровень цифровизации в химической отрасли и

¹ Для переписки:

Email: otrubyannikov-ev@rguk.ru

отсутствие положительных примеров внедрений, что объясняется целым рядом причин: отсутствием необходимой инфраструктуры, вопросами безопасности, высокими инвестициями, неочевидностью капиталовложений, недостатком квалифицированного персонала и так далее. Такого рода причины характерны для любого промышленного производства, но химическая промышленность является высоконаучеёмкой, что ещё более усложняет процесс цифровизации. Рассматривать химическое производство без исследовательской и проектной деятельности возможно, но в этом случае цифровизация предприятия заканчивается на автоматизации его хозяйственной деятельности [3]. В 2023 году в России отмечен рост внедрений отечественных программных продуктов, что в первую очередь связывается с потребностью обезопасить производственный процесс от внешних экономических факторов. Не менее важное влияние оказывает доступность готовых отечественных программных продуктов. При этом класс внедряемых систем весьма разнообразен: от ERP-систем на базе 1С (например, внедрение 1С: Корпорация в ПАО "КУЙБЫШЕВАЗОТ" [4]) до систем предикативной аналитики и управления оборудованием (в частности, внедрение CyberStudio в «ГалоПолимер Кирово-Чепецк» [5]). Однако стоит обратить внимание на отсутствие специализированного программного обеспечения для химических производств на отечественном рынке. Предлагаемые решения в большинстве своём типовые для различных видов производств и не учитывают специфику химической технологии. Данная тенденция имеет глобальный контекст [6] и связана с высоким разнообразием технологических решений, специфических процессов и высокой наукоёмкостью отрасли.

Материалы и методы решения задачи

Процесс цифровой трансформации имеет смысл рассматривать в несколько этапов, каждый из которых имеет свои особенности. При этом исследовательская деятельность в химической технологии будет рассматриваться как составляющая производственного процесса и должна быть включена в жизненный цикл продукта [7]. Выделенные в данной работе этапы характерным образом отражают развитие процесса цифровой трансформации во времени, начиная с первых работ в 1940 году и до текущего времени. Существующее производственное предприятие, находящееся в стадии цифровой трансформации, сразу может позволить себе использовать «лучшие практики», однако, на данный момент в России для химической технологии такие практики не сформированы, вследствие чего ожидаемо прохождение технологически лидирующих предприятий по всем выделенным в данной работе этапам цифровой трансформации.

Для формирования представления о цифровой трансформации стоит определить базисные понятия. В частности, [9] определяет цифровой двойник изделия как «связанную совокупность компьютерных моделей различных видов, описывающих с требуемым уровнем адекватности свойства и поведение экземпляра изделия, изменение его характеристик и внутренние процессы в зависимости от состояния внешней среды (управляющих воздействий), решаемых задач и условий их выполнения». Расширяет это понятие стандарт [8], устанавливающий общее понятие цифрового двойника изделия, а также общие положения и требования по разработке и применению цифровых двойников. Данный стандарт определяет общие положения создания цифровых двойников как

для вновь разрабатываемых изделий, так и для ранее спроектированных или уже эксплуатируемых изделий. Особо стоит отметить, что указанный стандарт определяет цифровой двойник изделия как систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и его составными частями.

Данный стандарт явно указывает на возможное отсутствие физического объекта для цифрового двойника, также указывается, что цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла продукта [8]. Стандарт применим для изделий машиностроения, но, по мнению представителей Росстандарта, на его базе могут и будут разрабатываться аналогичные стандарты для других отраслей промышленности, учитывающие специфику отрасли.

Ещё один разработанный стандарт [10] закрепляет общие положения и основополагающие принципы цифровых двойников производства, а также руководящие указания по созданию структуры цифровых двойников. Цифровой двойник производства представляет собой детальное моделирование конфигураций физических сущностей и динамическое моделирование изменений продукции, процесса и ресурсов в процессе производства. Цифровой двойник производства основан на цифровой модели, которая постоянно обновляется и изменяется по мере изменения физического аналога с целью синхронного представления состояния, условий работы, конфигурации продукта и состояния ресурсов. Представление цифрового двойника производства позволяет цифровому двойнику постоянно взаимодействовать с визуальными производственными элементами путем обмена данными об условиях эксплуатации.

В частности, [10] определяет, что цифровой двойник производства представляет собой «цифровую модель, которая постоянно обновляется и изменяется по мере изменения физического аналога с целью синхронного представления данных о статусе, условиях работы, конфигурации продукта и состоянии ресурсов». Реализация системы цифровых двойников производства должна иметь иерархическую структуру и реализовывать цифровые двойники на различных уровнях абстракции, начиная от уровня технологического оборудования, возможно и отдельных его частей, технологической операции, производственного участка, цеха, предприятия и т. д.

Использование цифрового двойника производства увеличивает показатели эффективности в цикле планирования и валидации, в соблюдении графика производства, улучшении понимания производственных элементов, динамическом управлении рисками, снижении затрат и т. д. [10]. Помимо прочего, технология цифровых двойников позволяет подробно разобраться во всех аспектах функционирования моделируемой системы, оценить различные варианты модернизации системы без ущерба физической системе, а также наглядно представить результаты.

Как указано на сайте компании Anylogic (The AnyLogic Company) [11], мирового лидера в производстве систем имитационного моделирования, «два ключевых элемента любых цифровых двойников — динамические имитационные модели и данные, отражающие текущее состояние реальной моделируемой системы. Благодаря этим элементам цифровой двойник становится эффективным инструментом для проведения экспериментов, анализа и наглядного представления данных».

В настоящее время ведутся активные работы по созданию цифровых двойников следующего поколения — объединяющих

цифровых двойников изделия (продукта) и цифровых двойников производства в рамках единой цифровой модели. Еще одним важным моментом развития технологии цифровых двойников является формирование «умной» цифровой тени (Smart Digital Shadow), которое происходит на основе информации о функционировании конкретных образцов изделия. В частности, выделяются цифровые двойники среды [12], ставятся вопросы топологии цифровых двойников, их иерархии и взаимодействия с окружающей средой [13].

Результаты и обсуждение

В рамках данной работы предложено выделить три этапа цифровой трансформации, каждый из которых характеризуется формированием определенного образа физических объектов или процессов в информационной среде.

Первый этап цифровой трансформации связан с формированием представления о функционировании объекта реального мира по нескольким критериям:

- 1) объект рассматривается как меняющийся во времени;
- 2) объект рассматривается с точки зрения функции его применения;
- 3) объект рассматривается как система, взаимодействующая с внешней средой, а также имеющая возможность к декомпозиции.

Изначальный целевой объект при отражении в цифровую составляющую рассматривается как классический чёрный ящик, при этом в начале создания цифрового образа рассматривается не сама система, а условная окружающая среда и взаимодействие системы с ней. Дальнейшая детализация чаще всего зависит от возможных состояний надсистемы, которая напрямую влияет на потребность получения информации о целевом объекте. Стоит отметить, что декомпозиция исходного объекта чаще всего происходит

строго по потребностям системы верхнего уровня. Причём на первом этапе цифровой трансформации чаще всего рассматривается конструктивная составляющая объекта, а функциональная составляющая затрагивается только в контексте взаимодействия с надсистемой и при формировании изменений в структуре объекта во времени. На этом этапе функционирование системы представляет собой набор взаимного влияния описанных объектов друг на друга. Данных, которые бы позволили рассмотреть именно функцию, а не структуру объектов на каждом из уровней выделенной системы, не существует, поэтому анализ межсистемных взаимодействий доступен только в рамках строго описанного функционала.

На этом этапе формируется цифровая модель, связанная цифровой нитью с физическим объектом. Цифровая нить [14] — это архитектура движения данных, которая связывает воедино информацию, создаваемую на протяжении всего жизненного цикла продукта, и она является основной коммуникационной платформой для всех продуктов компании в любой момент времени. Стоит отметить, что цифровая нить включает в себя механизм версионирования, который подразумевает хранение данных по всему времени эксплуатации продукта или системы. Информационный обмен между физическим объектом и цифровой моделью на этом этапе выполняется вручную. Для описания модели используются стандартные механизмы баз данных с высоким уровнем абстракции.

Второй этап цифровой трансформации непосредственно связан с понятием жизненного цикла продукта. Физический объект рассматривается с точки зрения классической V-диаграммы, представленной на рисунке 1 [15], характеризующей каждый из этапов: проектирование, создание и эксплуатацию продукта или системы.

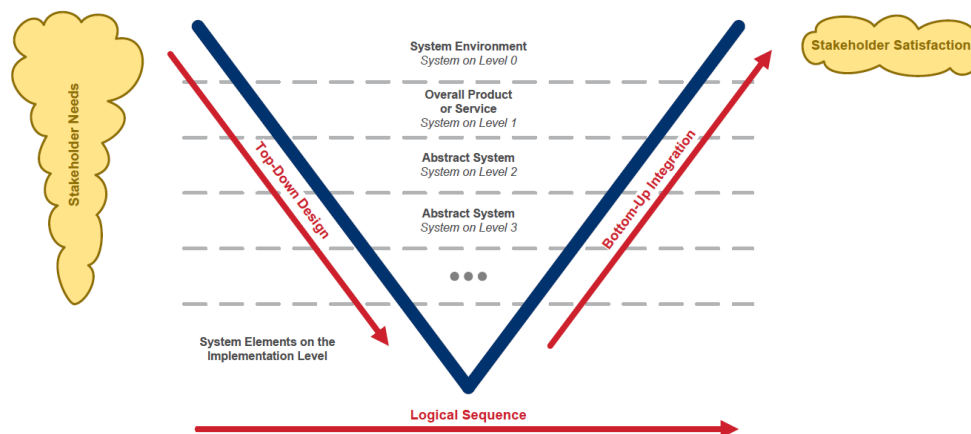


Рисунок 1 — Базовая V-диаграмма жизненного цикла продукта [15]

Относительно объекта, чей жизненный цикл рассматривается, появляются роли и позиции рассмотрения в зависимости от той информации, которая требуется на каждом из этапов каждому из исполнителей. Используемая формализация данных имеет уже глобальный характер и опирается на стандарты для унификации разрабатываемых систем. Исследуемый объект начинает рассматриваться как единое целое со своей информационной составляющей [16]. На одной из ступеней данного этапа цифровая нить начинает автономную одностороннюю работу в режиме онлайн. Использование датчиков позволяет актуализировать данные в реальном времени, что позволяет модели отражать важные характеристики физического объекта. Такого рода модель называется цифровой тенью или цифровым следом. На следующей ступени второго этапа двухсторонний информационный обмен между физическим объектом и моделью выполняется в режиме реального времени, а цифровой двойник начинает оказывать управляющие воздействия на физический объект. Надо отметить, что такого рода взаимодействие между информационной составляющей и физическим объектом на текущий момент видится как итоговый результат цифровой трансформации. При этом цифровой двойник формирует возможности проведения имитационных

предсказательных экспериментов, которые позволяют выполнить условную модификацию информационной составляющей объекта без потребности модификации физического экземпляра.

Сосредоточенность на жизненном цикле объекта ограничивает возможность применения существующих практик разработки информационных систем. В первую очередь это связано с наличием выстроенного порядка жизненных этапов объекта, что даже в случае с моделированием требует многократного повтора исходных действий. Объектная методика хранения на текущем этапе не позволяет расширить представление об объекте методами и способами, не указанными явным образом. Инварианта объекта возможна только в рамках реквизитов, заданных в стандарте, с помощью которого реализован объект.

Переосмысление данного подхода начинается с осознания независимости цифровой составляющей. В частности, такую концепцию предлагают в [17], где классическая V-диаграмма дополняется своим виртуальным отражением (рисунок 2), которое располагается симметрично относительно горизонтали. Каждый из этапов на виртуальном отражении представляет собой разновидность модели, характеризующей этап жизненного цикла реального продукта или системы.

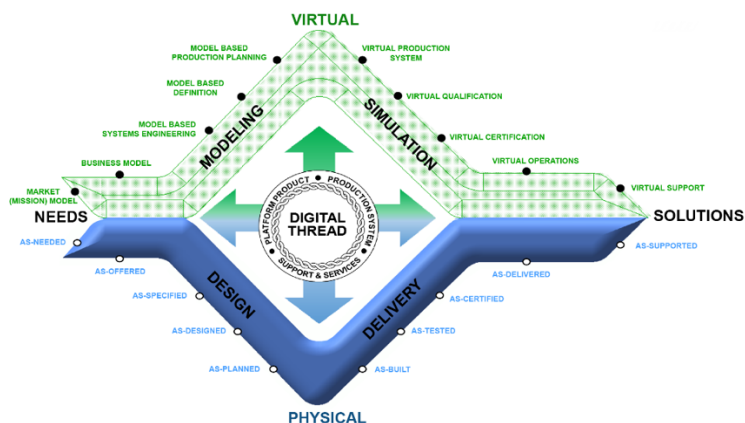


Рисунок 2 — Базовая V-диаграмма жизненного цикла продукта, при переходе к модельно-ориентированному проектированию [17]

В работе [17] отмечается, что обе части диаграммы объединяются цифровой нитью, которая показывает единое информационное поле, создающее возможности ко всестороннему обмену. Данная концепция является одной из первых в переосмыслении цифрового двойника, что формирует модельно-ориентированный подход. Базой данной концепции можно принять вторую стадию CALS-методологии, когда данные об объекте не просто имеют стандартизированный вид, но хранятся в единой логической структуре.

Очевидно, что для информационной составляющей объекта искусственно были наложены ограничения, которые использовались при исследовании физического объекта. Дальнейшее развитие цифровой трансформации приводит к изменению подхода к рассмотрению объекта. Имея прямые связи с физическим объектом через цифровые нити, цифровой двойник, являясь с одной стороны непосредственной частью физического объекта, с другой стороны является информационной системой со всеми присущими информационным системам качествами. В частности, информационная система может быть клонирована в отдельную ветку репозитория со специфическими характеристиками, а также использована в качестве модели для различных подходов к компьютерному

моделированию. В этом случае понятие жизненного цикла имеет смысл только для физического объекта, в то время как модель данного объекта, являясь информационной системой, не связана непосредственно с последовательностью этапов или временными ограничениями. Более того, модель перестаёт быть единственным экземпляром и может масштабироваться как количественно, так и эволюционно, меняясь по ходу адаптации к внешним требованиям.

При этом логически не верно говорить, что информационная система заикливется на этапе моделирования или проектирования, так как система существует сразу на всех этапах и может быть модифицирована на любом из них. Фактически возникающие процессы модификации модели реального объекта могут быть представлены как эволюция модели, при этом данный процесс эволюции является контролируемым и управляемым, а потребность по отношению к системе является показателем эволюционного отбора. Сама информационная система становится видом модели, который порождает следующие за ней экземпляры модели с отличными от исходной характеристиками. Если рассмотреть концепцию V-диаграммы, предложенную в [17], в качестве основы для описания второго этапа цифровой

трансформации, то третий этап должен характеризоваться пространственной схемой, где виртуальная составляющая многократно размножена перпендикулярно относительно изначальной схемы, при этом имеет ответвления, которые в свою очередь порождают другие ответвления. Физическая составляющая может существовать далеко не у всех экземпляров модели, а главное, в текущий момент времени может быть на любом этапе реализации жизненного цикла объекта. Независимость данного подхода от физической реализации позволяет утверждать, что происходит полноценный переход от объектно-ориентированного подхода, к модельно-ориентированному. При этом степень детализации модели является управляемой и меняется под внешние требования.

При проектировании химико-технологических систем можно выделить характерные уровни рассмотрения системы и соответствующие подходы к оценке и проектированию, существенно отличающиеся, как по размеру рассматриваемой системы, так и по детализации и стоимости вычислений.

Первый уровень детализации — рассмотрение всей системы (или технологического процесса) целиком как «чёрного ящика», для которого заданы входные параметры, управляющие воздействия и в результате функционирования которого реализуются выходные данные. Это, как правило, простые балансовые расчеты, очень быстрые, с минимальным количеством предоставляемой и выдаваемой информации.

Второй уровень — моделирование процесса, при котором обычно рассматривается нестационарное решение, не связанное с пространственными характеристиками. Для этого уровня характерна умеренная детализация, что и определяет

достаточную быстроту расчетов и среднюю стоимость вычислений. Подходит для проектирования процессов сложных установок и пилотных проектов.

Третий уровень рассмотрения — это фактически уровень отдельного аппарата, для которого решаются задачи вычислительной гидродинамики, позволяющие получить максимально подробные характеристики процесса. Это нестационарные многомерные задачи с максимальной детализацией и, соответственно, высокими вычислительными затратами.

Модельно-ориентированный подход, как и объектно-ориентированный в своё время, формируется под действием одноимённых парадигм разработки программного обеспечения, что является логичным, если рассматривать цифровой двойник как информационную систему. Особенностью перехода к модельно-ориентированному проектированию является отсутствие зависимости от стандартов хранения и предоставления информации, которые становятся производными относительно самой модели. Коммуникация исполнителей внутри системы сводится к минимуму, а единое информационное поле трансформируется в универсальную модель, порождающую информацию на границе систем — например, для передачи потребителю в соответствии с CALS-методологией. Ещё одной особенностью является изменяемая временная характеристика модели. Фактически на третьем этапе цифровой трансформации модель существует сразу во всех интервалах и линиях времени, так как является рассчитанной или предсказуемой. В линии реального времени существует цифровой двойник, в линии модельного времени существуют математические и имитационные модели, в линии времени разработки существует изменяющаяся исходная модель. Возможно предположить, что завершением третьего этапа цифровой

трансформации можно будет признать обоснование стандарта реализации исходной модели, а также управление условиями и факторами, определяющими её эволюцию. В работах [18, 19] представлено целостное понимание эволюции как механизма многоуровневого познания, при этом показывается, что сам процесс познания имеет термодинамическую природу. Такого рода подход открывает возможность рассмотрения динамики изменения, эволюции модели как физического процесса в рамках понятных зависимостей. Вектором, определяющим эволюцию, могут являться ограничительные условия в рамках исследовательской деятельности, как наиболее очевидный первоначально влияющий фактор. Поисковые алгоритмы при наличии достаточности данных могут создавать поколения новых моделей, отвечающих конкретным условиям или сформулированными в конкретных стандартах. Не менее важным является возможность управления процессом эволюции модели с точки зрения её создателя, где роль создателя может быть передана искусственному интеллекту. На сегодняшний день вопрос возможности использования искусственного интеллекта для исследовательской деятельности в химической отрасли уже частично отражён в работах [20–22]. Использование искусственного интеллекта как надсистемы для управления эволюцией позволит создавать самоорганизующиеся процессы исследования и, частично, передать исследовательскую функцию искусственному интеллекту.

Заключение

В работе рассмотрены современные подходы к цифровой трансформации. Причины слабой цифровизации химической отрасли могут быть сформулированы следующим образом: а) плохое информирование руководителей предприятий о возможностях цифровых технологий;

б) нежелание делать капиталовложения в цифровизацию элементов системы, не имеющих очевидной выгоды; в) отсутствие среды для формирования единого информационно поля внутри предприятия; г) высокая цена программного обеспечения без очевидных преимуществ по отношению к сформированному и устоявшемуся годами процессу производства. Однако в ближайшие годы потребность в цифровизации не уменьшится, а с учётом внешних экономических факторов очевидно возрастёт, а значит возникает необходимость в создании единой информационной среды, включающей в себя все этапы жизненного цикла продукта на базе открытого или отечественного программного обеспечения. В настоящее время единая среда для моделирования ещё не создана, но уже имеет свои очертания и находится на этапе разработки, а каждый из этапов этого процесса по отдельности уже функционирует и может использоваться в реальном производственном процессе. Для формирования потребности и логики функционирования данной среды имеет смысл разделить процесс цифровой трансформации на этапы, каждый из которых будет иметь свои характерные особенности. Целый ряд российских производителей уже представляют свои разработки для первого этапа цифровой трансформации, однако без поддержки химического сообщества вероятность появления общего отраслевого решения мала. Особо стоит отметить, что переход на второй этап цифровой трансформации без обеспечения интернета-вещей с учётом специфики конкретной отрасли невозможен. Этот вопрос так же требует консолидации химического сообщества для выработки стандартов и эталонных аппаратных решений. Текущие тенденции развития технологии цифровых двойников позволяют предположить, что динамические имитационные модели в ближайшее

время станут стандартом анализа и эксплуатации цифровых двойников. Общая тенденция к более глубокой детализации и структурированию производственных цифровых двойников, а также популяризация модельно-ориентированного подхода, позволяют предположить одновременное функционирование различных моделей на разных уровнях абстракции, которые будут объединены в умные цифровые двойники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Jenner F. Why the chemical industry is prioritizing digitalization : сайт. — EY. URL: https://www.ey.com/en_gl/advanced-manufacturing/why-the-chemical-industry-is-prioritizing-digitalization (дата обращения: 01.12.2023).

[2]. Overcoming digital transformation roadblocks in the chemical industry : сайт. — Elsevier. URL: https://www.elsevier.com/___data/assets/pdf_file/0011/972389/Overcoming-digital-transformation-roadblocks_whitepaper_CHEM-MAN_WEB.pdf (дата обращения: 01.12.2023).

[3]. Седяров О. И., Отрубянников Е. В. Перспективы применения современных информационных технологий в химической и смежных отраслях промышленности. Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности: программа и материалы пленарной сессии международного научно-технического симпозиума, посвящённого 120-летию со дня рождения П. Г. Романкова (ISTS «EESTE-2024»), 2024, с. 123–131. DOI: 10.37816/eeste-2024-p-123-131

[4]. Справочник «Внедренные решения». Автоматизация бизнес-процессов предприятия на базе комплекса интегрируемых типовых решений «1С: Корпорация» в ПАО «КУЙБЫШЕВАЗОТ» : сайт. — 1С. URL:

<https://1c.ru/solutions/public/details/1314796> (дата обращения: 01.12.2023).

[5]. HaloPolymer has transferred production processes to the domestic digital platform : сайт. — TAdviser. URL: tadviser.com/index.php/Project:HaloPolymer_Kirovo-Chepetsk (дата обращения: 01.12.2023). — Текст : электронный.

[6]. Peleg L. A. Digital Transformation & Industry 4.0 in the Chemical Industry : сайт. — Precognize.

URL: <https://www.precog.co/blog/digital-transformation-industry-4-0-in-the-chemical-industry/> (дата обращения: 01.12.2023).

[7]. Bessarabov A., Kvasyuk A. Cybernetic researches in technology of chemical reagents and high-purity substances. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 1365-1371.

DOI 10.1007/s10098-015-0985-y

[8]. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование Цифровые двойники изделия. Общие положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (дата обращения: 01.11.2023).

[9]. ГОСТ Р 57700.21-2020. Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573115942> (дата обращения: 01.11.2023).

[10]. ПНСТ 429-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174728> (дата обращения: 01.11.2023).

[11]. Создание и внедрение цифровых двойников : сайт. — AnyLogic. URL: <https://www.anylogic.ru/features/digital-twin/> (дата обращения: 01.12.2023).

[12]. Седяров О. И. Научно-практические основы разработки методов оценки и моделирования воздействия технологических процессов обувных предприятий на производственный персонал и окружающую среду : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук; Российский

государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство). Москва, 2022, 417 с.

[13]. Baez J. Symmetric Monoidal Categories: a Rosetta Stone : сайт. URL: <https://johnCarlosbaez.wordpress.com/2021/05/28/symmetricmonoidal-categories-a-rosetta-stone/> (дата обращения: 01.12.2023).

[14]. Singh V., Willcox K. E. Engineering Design with Digital Thread. *AIAA Journal*, 2018, vol. 56, no. 11, pp. 4515–4528. DOI 10.2514/1.J057255

[15]. Scheithauer D., Forsberg K. 4.5.3 V-Model Views. INCOSE International Symposium, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 502–516. DOI 10.1002/j.2334-5837.2013.tb03035.x

[16]. ISO 15926-2, Industrial automation systems and integration – Integration of life-cycle data for process plants including oil and gas production facilities – Part 2: Data model. – United States: American National Standards Institute (ANSI), 2023. URL: <https://www.iso.org/standard/29557.html> (дата обращения: 20.12.2023).

[17]. Model based engineering (mbe) supplier integration : сайт. - Boeing. URL: <https://www.boeing.com/mode>

lbasedengineering.html (дата обращения: 01.12.2023).

[18]. Vanchurin V., Wolf Y. I., Koonin E. V., Katsnelson M. I. Thermodynamics of evolution and the origin of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, vol. 119, no. 6, p. e2120042119. DOI 10.1073/pnas.2120042119

[19]. Vanchurin V., Wolf Y. I., Katsnelson M. I., Koonin E. V. Toward a theory of evolution as multilevel learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, vol. 119, no. 6, p. e2120037119. DOI 10.1073/pnas.2120037119

[20]. Toniato A., Schilter O., Laino T. Sustainability of the Chemical Industry. *CHIMIA*, 2023, vol. 77, no. 3, pp. 144. DOI 10.2533/chimia.2023.144 /

[21]. Linchevski C. How to Leverage AI to Benefit the Chemical Industry. *Chemie Ingenieur Technik*, 2021, vol. 93, no. 12, pp. 2040–2044. DOI 10.1002/cite.202100099

[22]. Back S., Aspuru-Guzik A., Ceriotti M. [et al.]. Accelerated chemical science with AI. *Digital Discovery*, 2024, vol. 3, no. 1, pp. 23–33. DOI 10.1039/D3DD00213F

Седляров Олег Иванович — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Отрубяников Егор Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Пустовойт Павел Александрович — аспирант, кафедра энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Польгуев Антон Игоревич — аспирант, кафедра энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Digital transformation of research, design and production activities in chemical technologies

O. I. Sedlyarov*, E. V. Otrubyannikov*¹, P. A. Pustovoyt*, A. I. Polguev*

*The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia

Abstract

The paper considers modern approaches to digital transformation of the production process. Weak digitalization of the chemical industry is noted. The need for a unified consideration of research, design and production activities is substantiated. Three stages of digital transformation are proposed, each of which complements the previous one. At the first stage, a model is created that accumulates information about a real object or process, which is updated manually. At the second stage, a single information field is formed through the use of digital threads. The digital component of an object or process is linked to the concept of a life cycle. Digital threads acquire autonomy. The result of the second stage of digital transformation can be recognized as the emergence of digital twins. At the third stage of digital transformation, the digital twin is rethought as an information system, which allows us to look at the product life cycle in the context of model-oriented design. The model-oriented approach expands the capabilities for managing the evolution of the system using of practices applicable to information systems.

Keywords

Digital transformation, chemical technology, digital twin, model-based engineering.

REFERENCES

- [1]. Jenner F. Why the chemical industry is prioritizing digitalization : сайт. — EY. URL: https://www.ey.com/en_gl/advanced-manufacturing/why-the-chemical-industry-is-prioritizing-digitalization (date accessed: 01.12.2023).
- [2]. Overcoming digital transformation roadblocks in the chemical industry : сайт. — Elsevier. URL: https://www.elsevier.com/___data/as-sets/pdf_file/0011/972389/Overcoming-digital-transformation-roadblocks_whitepaper_CHEM-MAN_WEB.pdf (date accessed: 01.12.2023).
- [3]. Sedlyarov O. I., Otrubyannikov E. V. Perspektivy primeneniya sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy v khimicheskoy i smezhnykh otraslyakh promyshlennosti [Prospects for the application of modern information technologies in the chemical and related industries]. Program and materials of the plenary session ISTS «EESTE-2024», 2024, pp. 123–131. DOI: 10.37816/eeste-2024-p-123-131
- [4]. Spravochnik «Vnedrennyye resheniya». Av-tomatizatsiya biznes-protsessov

¹ Corresponding author:

Email: otrubyannikov-ev@rguk.ru

predpri-yatiya na baze kompleksa integri-
ruyemykh tipovykh resheniy «1S: Korpo-
ratsiya» v PAO «KUYBYSHEVAZOT» :
sayt. — 1C. [Directory "Implemented Solu-
tions". Automation of enterprise business
processes based on the integrated standard
solutions complex "1C: Corporation" in
PJSC "KUIBYSHEVAZOT": website. —
1C.]

URL: <https://1c.ru/solutions/public/details/1314796> (date accessed: 01.12.2023). (In Russ.)

[5]. HaloPolymer has transferred produc-
tion processes to the domestic digital plat-
form : website. — TAdviser. URL: tadviser.com/index.php/ Project:HaloPoly-
mer_Kirovo-Chepetsk (date accessed:
01.12.2023).

[6]. Peleg L. A. Digital Transformation &
Industry 4.0 in the Chemical Industry : сайт.
— Precogize.

URL: [https://www.precog.co/blog/digital-
transformation-industry-4-0-in-the-chemical-
industry/](https://www.precog.co/blog/digital-transformation-industry-4-0-in-the-chemical-industry/) (date accessed: 01.12.2023).

[7]. Bessarabov A., Kvasyuk A. Cyber-
netic researches in technology of chemical re-
agents and high-purity substances. *Clean
Technologies and Environmental Policy*,
2015, vol. 17, no. 5, pp. 1365-1371.

DOI 10.1007/s10098-015-0985-y

[8]. GOST R 57700.37-2021.
Komp'yuternyye modeli i modelirovaniye
Tsifrovyye dvoyniki izdeliya. Obshchiye
polozheniya [GOST R 57700.37-2021. Com-
puter models and modeling. Digital twins of
a product. General provisions].
URL: [https://docs.cntd.ru/document/12001
80928](https://docs.cntd.ru/document/1200180928) (date accessed: 01.11.2023). (In Russ.)

[9]. GOST R 57700.21-2020. Komp'yuter-
noye modelirovaniye v protsessakh raz-
rabotki, proizvodstva i obespecheniya eksplu-
ata-tsii izdeliy. Terminy i opredeleniya
[GOST R 57700.21-2020. Computer modeling
in the processes of development, production

and operation of products. Terms and defini-
tions].

URL: [https://docs.cntd.ru/document/57311
5942](https://docs.cntd.ru/document/573115942) (date accessed: 01.11.2023). (In Russ.)

[10]. PNST 429-2020. Umnoye proizvod-
stvo. Dvoyniki tsifrovyye proizvodstva.
Chast' 1. Obshchiye polozheniya [PNST 429-
2020. Smart production. Digital production
twins. Part 1. General provisions].
URL: [https://docs.cntd.ru/document/12001
74728](https://docs.cntd.ru/document/1200174728) (date accessed: 01.11.2023). (In Russ.)

[11]. Sozdaniye i vnedreniye tsifrovyykh
dvoynikov: website. [Creation and implemen-
tation of digital twins]— AnyLogic.
URL: [https://www.anylogic.ru/features/digi-
tal-twin/](https://www.anylogic.ru/features/digital-twin/) (date accessed: 01.12.2023).
(In Russ.)

[12]. Sedlyarov O. I. Nauchno-prakti-
cheskiye osnovy razrabotki metodov otsenki
i modelirovaniya vozdeystviya tekhnolog-
icheskikh protsessov obuvnykh predpriyatiy
na proizvodstvennyy personal i okru-zhay-
ushchuyu sredu : dissertatsiya na soiskaniye
uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk
[Scientific and practical foundations for the
development of methods for assessing and
modeling the impact of technological pro-
cesses of shoe enterprises on production per-
sonnel and the environment: dissertation for
the degree of Doctor of Technical Sciences].
Moscow, 2022, 417 p. (In Russ.)

[13]. Baez J. Symmetric Monoidal Cate-
gories: a Rosetta Stone : сайт. URL:
[https://johnCarlosbaez.word-
press.com/2021/05/28/symmetricmonoidal-
categories-a-rosetta-stone/](https://johnCarlosbaez.wordpress.com/2021/05/28/symmetricmonoidal-categories-a-rosetta-stone/) (date accessed:
01.12.2023).

[14]. Singh V., Willcox K. E. Engineering
Design with Digital Thread. *AIAA Journal*,
2018, vol. 56, no. 11, pp. 4515–4528.
DOI 10.2514/1.J057255

[15]. Scheithauer D., Forsberg K. 4.5.3 V-
Model Views. INCOSE International Sympo-
sium, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 502–516.
DOI 10.1002/j.2334-5837.2013.tb03035.x

- [16]. ISO 15926-2, Industrial automation systems and integration – Integration of life-cycle data for process plants including oil and gas production facilities – Part 2: Data model. – United States: American National Standards Institute (ANSI), 2023. URL: <https://www.iso.org/standard/29557.html> (date accessed: 20.12.2023).
- [17]. Model based engineering (mbe) supplier integration : сайт. - Boeing. URL: <https://www.boeing.com/modelbasedengineering.html> (date accessed: 01.12.2023).
- [18]. Vanchurin V., Wolf Y. I., Koonin E. V., Katsnelson M. I. Thermodynamics of evolution and the origin of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, vol. 119, no. 6, p. e2120042119. DOI 10.1073/pnas.2120042119
- [19]. Vanchurin V., Wolf Y. I., Katsnelson M. I., Koonin E. V. Toward a theory of evolution as multilevel learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, vol. 119, no. 6, p. e2120037119. DOI 10.1073/pnas.2120037119
- [20]. Toniato A., Schilter O., Laino T. Sustainability of the Chemical Industry. *CHIMIA*, 2023, vol. 77, no. 3, pp. 144. DOI 10.2533/chimia.2023.144 /
- [21]. Linchevski C. How to Leverage AI to Benefit the Chemical Industry. *Chemie Ingenieur Technik*, 2021, vol. 93, no. 12, pp. 2040–2044. DOI 10.1002/cite.202100099
- [22]. Back S., Aspuru-Guzik A., Ceriotti M. [et al.]. Accelerated chemical science with AI. *Digital Discovery*, 2024, vol. 3, no. 1, pp. 23–33. DOI 10.1039/D3DD00213F

Sedlyarov O. I. — Dr. Sc. (Eng.), Head of Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Otrubyannikov E. V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Pustovoyt P. A. — postgraduate student, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Polguev A. I. — postgraduate student, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Цифровая трансформация исследовательской, проектной и производственной деятельности в химических технологиях / О. И. Седляров, Е. В. Отрубьянников, П. А. Пустовойт, А. И. Польгуев // *Промышленные процессы и технологии*. 2024. Т. 4. № 1(11). С. 86 – 98.

DOI: 10.37816/2713-0789-2024-4-1(11)-86-98

Please cite this article as:

Sedlyarov O. I., Otrubyannikov E. V., Pustovoyt P. A., Polguev A. I. Digital transformation of research, design and production activities in chemical technologies. *Industrial processes and Technologies*, 2024, vol. 4, no. 1(11). pp. 86 – 98.

DOI: 10.37816/2713-0789-2024-4-1(11)-86-98