**Цифровые двойники**

Оглавление

[Введение 2](#_Toc77023319)

[Что такое цифровой двойник? 2](#_Toc77023320)

[Виды цифровых двойников 4](#_Toc77023321)

[Подходы к построению ЦД технологических процессов 5](#_Toc77023322)

[Ограничения при построении цифровых двойников 8](#_Toc77023323)

[Система управления инженерными данными (СУИД) 9](#_Toc77023324)

[Отраслевые стандарты организации СУИД 11](#_Toc77023325)

[Экономический эффект внедрения ЦД и СУИД 12](#_Toc77023326)

[От Цифрового двойника к Цифровому заводу 14](#_Toc77023327)

[Цифровые двойники и СУИД в СИБУР 14](#_Toc77023328)

[Платформы для построения ЦД 16](#_Toc77023329)

[Перспективы ЦД 16](#_Toc77023330)

[Заключение 17](#_Toc77023331)

[Материалы для дополнительного изучения 18](#_Toc77023332)

# Введение

## Что такое цифровой двойник?

**Цифровой двойник** (*англ.* *Digital Twin*) — цифровая копия физического объекта или процесса, помогающая оптимизировать эффективность бизнеса [**(wiki).**](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%B4%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%BA)

Компания IBM, которая является одним из лидеров в сфере информационных технологий, формулирует это понятие более чётко: **цифровой двойник** – виртуальное представление объекта или системы, которое существует в течении его жизненного цикла, обновляется на основе данных в режиме реального времени и использует методы симуляции и машинного обучения для обеспечения поддержки принятий решений.

При этом однозначного общепринятого значения термина «цифровой двойник» пока еще не сформировалось. Поэтому для целей практического применения считаем необходимым задать набор признаков, по которым можно четко определить, что относится к классу ЦД, а что нет. В данном описаниипод цифровым двойником будем понимать прежде всего **цифровой продукт** (информационную систему), который встроен в ИТ-ландшафт компании и решает конкретные производственные задачи. При этом технологии, используемые для реализации, могут быть совершенно разными и вторичны. Таким образом, ЦД представляет собой объект или процесс[[1]](#footnote-1) (далее моделируемый процесс или объект будем называть общим словом - **системой**) в виде математической модели[[2]](#footnote-2) или комплекса моделей (далее - **Модель**), которые в цифровом представлении дублируют поведение реального объекта. С помощью таких моделей можно анализировать поведение объекта или процесса, изменение его состояния с течением времени, а также делать выводы об интересующих нас качествах и ограничениях системы без непосредственного проведения экспериментов на реальной системе.

Исследования поведения системы приобретают особую значимость, если реальная система находится только в стадии проектирования и еще фактически не существует. Это позволяет нам оценить, насколько будущая система соответствует предъявляемым к ней требованиям как с технологической, так и с экономической точки зрения, и, при необходимости, внести изменения в проект. Для существующих систем также не всегда есть возможность проводить эксперименты по соображениям промышленной безопасности, особенно на опасных производствах, или из-за высоких экономических рисков. В данном случае использование математической модели позволит сделать необходимые оценки и выводы.Отличительной особенностью ЦД является обеспечение синхронизации Модели с фактическим состоянием на основе реальных данных, собираемых с помощью сенсоров и датчиков, установленных на объекте. Это выделяет его из множества решений, в которых так или иначе моделируются поведение различных реальных систем.

Таким образом, ЦД – это цифровой продукт, который включает в свой состав комплекс математических моделей и синхронизирован с производственными данными в реальном времени, т. е. можно сказать, что это живая система, которая с одной стороны обладает «собственным мнением» о происходящем, а с другой стороны осуществляет сверку с актуальными данными, поступающими с производства. Производственные данные существуют независимо от наличия или отсутствия ЦД, поэтому не могут считаться его частью. Но при отсутствии актуальных, поступающих в обработку в ЦД, он перестает быть таковым. Разумеется, период актуализации данных зависит от конкретной задачи.

 Существует распространенное мнение, что ЦД неразрывно связан с технологией IoT, возможности которой используются для сбора информации. Однако, сама идея и основные принципы цифрового двойника, так же, как и первые реализации, появились задолго до появления IoT. Поэтому считаем, что IoT можно рассматривать как один из драйверов развития технологии (enabler), который упрощает построение ЦД за счет унификации протоколов коммуникаций, то есть является одним из факторов, которые делают ЦД более типовым решением для реализации.

В силу того, что любая реальная система включает множество взаимосвязанных компонентов, еще одним признаком цифрового двойника является периметр охвата, то есть масштаб. Если предметом математического моделирования в привычном для математиков смысле может быть какое-то одно физическое явление в ограниченных условиях, например, распространение тепла в стержне, то зона охвата цифрового двойника на практике гораздо шире. Например, в промышленности это производственная установка или целый завод, представляющий собой комплекс установок для последовательной обработки продукции. А ЦД завода моделирует весь комплекс происходящих на нем процессов с учетом их взаимосвязей и зависимостей. Конечно, сложность модели зависит от периметра. Чем больше процессов и систем покрывает цифровой двойник, тем сложнее и дороже реализовать низкоуровневую детализацию.

Бурное развитие вычислительных систем в части роста их производительности сделало возможным такое моделирование для многих областей, позволяя моделировать сложные процессы с высокой точностью.

## Виды цифровых двойников

На текущий момент ЦД представлены в самых разных сферах и отраслях. Некоторые распространенные примеры приведены ниже.

1. **Цифровой двойник технологического процесса[[3]](#footnote-3) на производстве, под которым мы здесь понимаем набор входных потоков (сырья, материалов или комплектующих), процесс их переработки (или сборки) для получения целевых потоков продукции на выходе.**

 Например, на перерабатывающем заводе цифровой двойник повторяет процесс производства, то есть процесс получения какого-либо целевого продукта из исходного сырья, позволяя оценивать влияние параметров технологического режима на состояние установки, на которой этот процесс осуществляется, посчитать ключевые показатели этого процесса, такие как выход готовой продукции при заданном потреблении сырья и электроэнергии и другие. Имея модель подобной системы, можно проанализировать последствия изменения таких параметров, как температура или давление на ключевые показатели процесса, а также подобрать оптимальный режим работы установки.

1. **Цифровой двойник процессов управления работой склада.**

 Модель процессов работы склада позволяет давать качественную и количественную оценку его работы в различных конфигурациях – входных и выходных потоков продукции, условий обработки продукции, численности персонала и их распределения по ролям. Задавая различные условия – уровень загрузки, расписание поставок и отгрузок, требования по обслуживанию и т. д., можно оценить, насколько эти требования выполняются, т.е. какая доля обрабатываемых заказов укладывается в нормативное время по обработке и какие вероятные отклонения будут наблюдаться.

1. **Цифровой двойник транспортной сети города.**

Как и в предыдущем примере, данный ЦД моделирует процесс движения транспорта в городе и позволяет при заданных статистических показателях транспортных потоков оценивать скорость дорожного движения на различных участках, определять проблемные зоны («бутылочное горлышко»), видеть влияние различных точечных изменений на дорожную обстановку в целом. Под транспортной сетью можно понимать систему автомобильных дорог, развязок, перекрестков и светофоров. Можно расширить периметр модели и также включать другие виды транспорта в зависимости от того, какие задачи мы решаем.

Это лишь несколько примеров, показывающих, насколько разнообразными могут быть системы, для которых разрабатываются цифровые двойники. Как следствие, также богаты и разнообразны подходы и инструменты для их построения, предлагающие набор решений для каждого направления моделирования.

 **Резюмируя сказанное, создание цифрового двойника позволяет:**

- определить ограничения, выявить проблемные участки будущего объекта на этапе проектирования;

- оценивать граничные значения режимов эксплуатации и влияние на экономические показатели;

- отслеживать отклонения от целевого процесса в режиме реального времени для своевременной реакции и корректировки.

- прогнозировать развитие событий в реальной системе и выполнять корректирующие мероприятия превентивно;

- проводить анализ «что, если» для выбора оптимального режима функционирования системы, поиска наиболее перспективных направлений модернизации с целью повышения эффективности, минимизации рисков внеплановых остановов или потери производительности (для производственных систем), повышения управляемости процессов;

# Подходы к построению ЦД технологических процессов

Существуют различные подходы к построению цифровых двойников. Выбор метода определяется предметной областью, доступностью исторических данных о процессе и требованиями к конечной модели.

 Если говорить про моделирование производственных систем на примере нефтехимического производства (как упоминалось ранее, подход применим для любого производства, но для удобства восприятия рассматриваем на более конкретном примере), существует два подхода к построению подобных моделей: **технологическое моделирование** и **статистическое моделирование.**

**Технологическое моделирование** (first principle modeling, rigorous modeling) заключается в построении модели процесса на основе физических принципов, которые хорошо изучены и могут быть сформулированы с помощью математических описаний. Обычно такие явления описываются в виде систем дифференциальных уравнений, решение которых находится с использованием численных методов. При таком виде моделирования у нас есть набор формул, используя которые мы можем получить решение для конкретной задачи. Причём это описание специфично для разных физических явлений.

**Статистическое моделирование** или моделирование на основе данных – это построение моделей на основании исторических массивов данных с использованием инструментов машинного обучения. В отличие от технологического моделирования в данном подходе используется набор универсальных функций, которые не зависят от предметной области моделирования, при этом задача построения модели сводится к подбору некоторого набора весов и построению композиции функций из некоторого семейства[[4]](#footnote-4).

В обоих случаях мы ищем зависимости между факторами влияния или признаками (параметры технологического режима и внешние факторы) и целевыми показателями, значение которых мы хотим оценить. В случае статистического моделирования точная природа процесса и причинно-следственные связи могут оставаться неизвестными.

В последние годы активно развивается гибридное моделирование, в котором успешно совмещаются оба подхода. Это позволяет, с одной стороны, компенсировать неточность строгой модели, которая возникает при технологическом моделировании из-за первоначального упрощения процесса и неизбежных отличий от реальной установки, а с другой стороны, помогает преодолеть проблему недостатка и зашумленности данных, которая возникает при статистическом моделировании.

Модели цифрового двойника должны обновляться по мере развития системы или модернизации процесса для поддержки его в актуальном состоянии, чтобы он мог выполнять свои основные функции, в том числе роль платформы для генерации и проверки идей по развитию.

Поддержка цифровых двойников в актуальном состоянии требует постоянной работы квалифицированной команды специалистов. Численность такой команды должна быть достаточной для поддержания того уровня качества и точности моделей, при котором достигаются целевые характеристики системы. Но сложность модели не должна быть настолько высокой, чтобы затраты на ее поддержку превышали экономические эффекты от применения, поскольку в конечном счете ЦД разрабатывается для повышения эффективности работы. Другими словами, модель должна быть настолько простой, насколько это возможно, но, чтобы от этого упрощения она не теряла практический смысл. Необходимо оценивать в совокупности стоимость создания и сопровождения, ожидаемую частоту необходимых изменений и возможности компании по обеспечению актуальности.

Наилучших эффектов можно достигнуть в тех случаях, когда наработки и идеи можно тиражировать, снижая время и стоимость последующих внедрений инструмента.

Применение ЦД для технологических процессов на производстве позволяет увеличивать срок эксплуатации оборудования, повышать эффективность его работы, снижать затраты на техобслуживание и ремонты, предотвращать аварийные ситуации и обеспечивать более интенсивное технологическое развитие производства в целом за счет возможности проверки гипотез.

 Вне зависимости от технологии реализации на промышленных предприятиях ЦД должен быть интегрирован в контур управления, т.е. в решения класса SCADA. Под такими решениями мы понимаем комплекс систем управления технологическими процессами – АСУТП и MES-системы, которые используются для управления производством.

Эта интеграция необходима для обеспечения потоков данных в реальном времени от оборудования к ЦД непосредственно из АСУТП либо посредством MES для обеспечения мониторинга и обеспечения ЦД актуальными данными о состоянии производства. В случае встраивания ЦД в контур управления работой оборудования необходима и обратная интеграция для выдачи управляющих сигналов на контроллеры, поскольку такие действия всегда осуществляются через АСУТП, как и при построении систем класса APC/RTO.

# Ограничения при построении цифровых двойников

 Несмотря на то, что сфера моделирования бурно развивается, сложность отдельных областей как с точки зрения наукоёмкости, так и требований к вычислительным ресурсам настолько высоки, что разработка и сопровождение ЦД оказывается дорогостоящим проектом, требующим уникальных компетенций и оборудования. При этом не всегда можно изначально гарантировать необходимый уровень точности воспроизведения реального процесса. В таких случаях затраты могут быть высокими, а экономический эффект - неочевидным.

 Препятствием также может являться неготовность производства к внедрению ЦД. Ограничения технологического контура управления могут не позволить реализовать потенциальные преимущества. Например, коридор автоматического поддержания параметров режима слишком широкий, чтобы реализовать прецизионное управление в соответствии с рекомендациями цифрового двойника, которые могут обеспечить более высокое и устойчивое качество продукции. В таких случаях внедрение ЦД имеет смысл только после модернизации исходного оборудования. Данная проблема связана с тем, что требования к объёму и номенклатуре контрольно-измерительного оборудования (КИП), а также требования к качеству данных, которые необходимы для построения ЦД, могут быть более высокими, чем требования к оборудованию для обеспечения производственного процесса. Таким образом, для получения необходимого объёма данных может потребоваться существенное дооснащение КИП и длительный период накопления данных. Для ряда производств дооснащение КИП – это отдельный масштабный проект, как в силу высокой стоимости оборудования, так и в силу необходимости внесения изменения в проектную документацию и её согласования с регулятором. Помимо этого, для непрерывных производств такая модернизация может быть осуществлена только во время остановочного ремонта, который может проводиться один раз в год или реже. Учитывая все эти факторы, сам период от момента принятия решения о создании ЦД до получения требуемого массива данных может занять несколько лет. Поэтому в данной ситуации необходимо взвешивать потенциальные эффекты от применения ЦД с одной стороны и совокупные затраты на его создание и поддержку с другой.

 Даже при успешно реализованном ЦД необходимо поддерживать его в актуальном состоянии, что требует операционных затрат.

 Еще одним существенным ограничением для повсеместного применения ЦД является точность моделей вследствие того, что любая модель является упрощением и поэтому отличается от реальности. Чем сложнее моделируемый процесс, тем больше расхождение, особенно при необходимости долгосрочного прогнозирования процессов производства. Для решения ряда прикладных задач требуемый уровень точности прогнозирования оказывается выше, чем максимально достижимый в текущих условиях.

 Этот вопрос становится особо актуальным, если на производстве используется всего одна установка, а случайная составляющая процесса заметно выражена. В этом случае ЦД сможет спрогнозировать наиболее вероятный вариант развития событий, но не сможет «угадать» точное состояние из широкого диапазона возможных состояний.

 В случае, когда используется множество однотипных установок, статистика начинает работать на нас, то есть мы чаще наблюдаем поведение установки, близкое к прогнозируемому.

В производственных компаниях цифровые двойники могут быть включены в контур автоматического управления путем интеграции с системами класса APC и RTO, а могут быть использованы только для мониторинга и выдачи рекомендаций, в этом случае получая только входные данные из АСУТП и не формируя управляющие сигналы. Применение автоматического управления на базе решений, выработанных в результате работы ЦД, ведет к исключению человеческого фактора в процессе принятия решений и внедрению концепции «цифрового завода».

# Система управления инженерными данными (СУИД)

Для быстрой и эффективной реализации ЦД на промышленных предприятиях важной предпосылкой является **система управления инженерными данными (СУИД или engineering data warehouse)**. Хотя ЦД может быть построен автономно, и наличие СУИД не является обязательным условием, наличие данной информационной системы в производственной компании решит проблемы оперативного сбора и поиска необходимой информации с необходимым уровнем детализации.

СУИД не содержит данных реального времени и информации о формальных математических моделях, но включает в себя информацию о спецификациях отдельных компонентов и возможностях их использования в работе установок, то есть структурированную информацию о каждом из компонентов от элементарных комплектующих до завода целиком, что является важным фактором успеха для проектирования цифрового двойника.

 Любое крупное промышленное предприятие генерирует и накапливает огромное количество технологической и инженерной информации, начиная от спецификаций на комплектующие до технических паспортов оборудования. Наличие такой базы знаний, которая помогла бы понять, как связаны процессы и отдельные единицы технологического оборудования, является важной предпосылкой для реализации цифровых двойников.

Именно поэтому мы хотим уделить отдельное внимание задаче построения СУИД, которая позволяет накапливать и систематизировать данные об иерархической структуре производственного объекта (как технологической, так и географической) и оборудовании, а далее - использовать их для разработки и развития цифровых двойников.

СУИД объединяет в себе составные части информации будущего завода в виде гибкой структуры, а именно 1D - данные, 2D - документацию и 3D - модель. Проект построения СУИД подразумевает одновременное внедрение бизнес-процесса управления информацией (information management), который без такой платформы не мог бы быть реализован. Проект включает в себя управление технической документацией, инженерными данными и 3D моделями, которые после строительства объекта (завода или предприятия) обогащаются изменениями, произошедшими в процессе строительства, и мы получаем полноценную информационную модель «как построено» (as-built).

Основные преимущества СУИД:

* Доступ к информации прост и понятен как в Google. Удобная поисковая система по многочисленным параметрам, входящим в базу знаний.
* Централизованный сбор и автоматизированный контроль качества данных. Инженерные данные автоматически проверяются в СУИД на предмет соответствия требованиям к данным в спецификациях (полнота, целостность, правила наименования).
* Точно сформулированные требования к объему и качеству инженерных данных (модель данных, классификатор, процедуры и критерии проверок).
* Процесс структурирован и формализован. Данные подготовлены для пользователей.
* Единый источник инженерных данных для всех участников (людей, подразделений и компаний, работающих на разных этапах создания и эксплуатации объекта), позволяющий быстро найти информацию.

СУИД представляет возможность по одному клику получить доступ к инженерной информации с использованием единого web-интерфейса всем заинтересованным пользователям:

* Просмотр документации в цифровом виде (схемы, опросные листы и т.д.).
* Просмотр связанной с единицей оборудования технической информации – номер по технологической схеме, серийный номер, номер заказа на поставку и т.д. – набор данных, необходимый для обслуживания оборудования и его заказа.
* Просмотр позиционирования оборудования в 3D-модели.

Обращение сотрудников компании к инженерной информации в СУИД потенциально может сократить до 60% рабочего времени, которое обычно тратится на поиск и сбор информации в условиях ее отсутствия ([Study IDC, Feldman et al (2005)](https://www.slideshare.net/PingElizabeth/the-hidden-costs-of-information-work-2005-idc-report))

После завершения строительства объекта и перехода на этап эксплуатации происходит развитие СУИД и внедрение процесса бесшовной передачи данных в производственные системы, необходимого для управления изменениями, проведения будущих реконструкций и модернизаций оборудования.

## Отраслевые стандарты организации СУИД

Для крупных капитальных проектов (Greenfield) построение информационной модели стало отраслевым стандартом. С ее помощью компания экономит ресурсы на каждом этапе проекта строительства, и далее в процессе пуска и эксплуатации предприятия, когда необходимо знать, где находится то или иное оборудование, как заменить его, отремонтировать, понимая при этом все технические и технологические параметры в привязке к технической документации и трехмерному отображению. Любая техническая информация доступна по одному клику как в современном поисковике, что также критично при будущей реконструкции или модернизации завода/предприятия. Это позволит избежать повторных затрат ресурсов на поиск данных, которые без такой платформы найти будет практически невозможно через 10-20 лет.

Также немаловажно учитывать потребность в аналитике на основе данных, которая позволит управлять будущим заводом с использованием систем машинного обучения и искусственного интеллекта.

Существует ряд стандартов, описывающих правила построения информационных моделей, один из них **ISO 15926** — стандарт представления данных, опирающийся на идеи [семантических сетей](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B5%D1%82%D1%8C) и [Resource Description Framework](https://ru.wikipedia.org/wiki/Resource_Description_Framework), был разработан в нефтеперерабатывающей отрасли [**(wiki)**](https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO_15926)**.**

Основой стандарта является модель данных, описывающая полный комплекс мероприятий и практик жизненного цикла установок непрерывного производства и определяющая в едином контексте стандартизированной онтологии значение сведений о жизненном цикле. Предлагаемая стандартом онтология поддерживает все группы описаний, которыми могут обладать по отношению к установке инженеры-технологи, инженеры по оборудованию, операторы, инженеры по техническому обслуживанию и другие специалисты. На базе этой модели данных предлагаются механизмы валидации, интеграции, анализа и т. п[. **(wiki)**](https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO_15926)**.**

Существенного прогресса в стандартизации достигла команда, разработавшая стандарт CFIHOS - Capital Facilities Information Handover Specification (<https://www.jip36-cfihos.org/>), собрав опыт и разработки в области управления информацией крупных нефтегазовых компаний.

В России направление СУИД развивалось крайне медленно, тогда как во множестве других стран стандарты управления информацией для крупных капитальных проектов развиваются уже более 40 лет. Но сейчас мы видим интерес российских компаний к данному подходу и перспективы его развития в нашей стране.

# Экономический эффект внедрения ЦД и СУИД

Экономическая ценность внедрения цифровых двойников для комплекса сложных высокотехнологичных производств состоит в повышении эффективности процессов, т. е. за счет повышения выхода продукции, снижения нормы расходов сырья, снижения количества и продолжительности внеплановых остановов, увеличения срока эксплуатации оборудования за счет оптимизации режима производства.

При этом надо отметить, что кроме прямых экономических эффектов есть и косвенные, так называемые софт-эффекты, которые не всегда можно оценить количественно, но которые позитивно влияют на развитие компании, как, например, повышение уровня компетенций персонала, непосредственно влияющее на производительность работы.

 Наличие СУИД в компании, помимо важного условия для построения ЦД, само по себе повышает эффективность использования информации, что приводит к сокращению затрат на проектирование объекта капитального строительства, пуско-наладочные работы и ввод в эксплуатацию, а в процессе производства к сокращению времени простоя активов и снижению общих затрат на их обслуживание.

Система управления инженерными данными позволяет значительно повысить уверенность в технологической целостности активов за счет учета всех взаимосвязей между единицами оборудования, документацией и наборами данных, уменьшая тем самым производственные технологические риски в процессе эксплуатации.

Исследование King, Casto & Jones (1994) показывает, что инженеры тратят 40-66% своего времени на общение, чтобы получить информацию для выполнения своей работы. Опрос IDC, Feldman et al (2005) далее установил, что средний сотрудник из 600 американских опрошенных компаний тратят 9,5 часов на поиск информации еженедельно, что в среднем стоит 14 000 долларов США на человека в год.

Еще один пример - проект Greater Plutonio по строительству судна FPSO для добычи и обработки углеводородов на глубоководном месторождении в Блоке 18 оффшорной концессии BP в Анголе – цифры получены в результате интервью:

• Создание и активное использование Цифрового Двойника сэкономило примерно 3-4 месяца до запуска производства, обеспечив оперативный обмен информацией между всеми участниками проекта и существенно облегчив подготовку запуска с настройкой модели тренажера для раннего обучения эксплуатации актива и написания руководств по эксплуатации. Предварительная проведенная оценка операционной готовности позволила сэкономить более 3 миллионов фунтов стерлингов.

• Интеграция информационных систем проекта в Цифровой Двойник позволила сэкономить 12 миллионов долларов США за несколько лет эксплуатации.

• Обеспечение с помощью Цифрового Двойника регионального оперативного склада запасных частей, доступного для всех предприятий в регионе, привело к общей экономии в 500 тысяч фунтов стерлингов.

• Со стороны IT использование одних и тех же программных и облачных платформ для Цифрового Двойника на разных проектах в портфеле корпорации привело к экономии более 2 миллионов фунтов стерлингов.

Важно отметить, что крупным компаниям, реализующим капитальные проекты строительства, особенно в сложных технологических направлениях, необходимо заботиться о качестве и структурированности данных от начала проектирования завода/предприятия, поскольку именно на этих данных будет основана его стабильность в течение всего жизненного цикла.

# От Цифрового двойника к Цифровому заводу

В этом разделе мы вводим еще одну парадигму – Цифровой завод. Понятие еще более широкое и неоднозначное, чем ЦД, но при этом отражающее современный взгляд на будущее заводов.

**Цифровой завод** – это производственное предприятие, которое может функционировать практически автономно, требуя минимального вмешательства персонала. Очевидно, что для это должно быть выполнено множество условий – все контуры управления должны быть автоматизированы, технологические процессы в режиме автоматического управления должны обеспечивать высокий уровень стабильности, чтобы обеспечивать необходимый уровень качества продукции, промышленную безопасность как в штатном режиме, так и за его пределами, при этом горизонт управления с точки зрения автономного управления должен быть достаточно большим, чтобы не требовать постоянно оперативного ручного управления в течение длительного времени.

На сегодня Цифровой завод – это ориентир, к которому можно стремиться. Не последнее место в этой парадигме занимают Цифровые двойники, которые, будучи интегрированными в контур управления, позволяют с одной стороны обеспечивать оптимальное управление производством, а с другой стороны обеспечивать раннее обнаружение аномалий, то есть отклонений в производственном процессе, и прогнозировать развитие нештатных ситуаций для своевременного подключения специальных мобильных бригад или переключения управления на операторов.

# Цифровые двойники и СУИД в СИБУР

Цифровые двойники являются полезными помощниками как на стадии разработки системы, так и её эксплуатации, поэтому СИБУР реализует проекты в этой области, создавая продукты самого разного назначения.

При этом наиболее актуальными направлениями на сегодня день являются **цифровые двойники производственных установок** и комплексные **системы для управления строительством современных заводов** – Запсибнефтехим и АГХК, где они применяются для обеспечения максимальной скорости возведения и монтажа, а также контроля выполнения, когда требуется согласованная работа большого количества рабочих и подрядных организаций.

Компания СИБУР в 2019 году запустила пилотный проект построения Системы управления инженерными данными (СУИД) для будущего Амурского газохимического комплекса (АГХК), строительство которого началось в 2020.

АГХК станет одним из крупнейших в мире предприятий по производству полиэтилена и полипропилена востребованных на российском и мировом рынках марок. Производственная мощность комплекса составит до 2,7 миллионов тонн этилена в год.

Команда управления инженерными данными Сибур Диджитал на основе лучших мировых практик разработала внутренний стандарт и модель данных именно для нефтехимического сектора, учитывающую специфику производств Сибура, в частности проекта АГХК.

В течение 7 месяцев были созданы команда, стандарты и процедуры по управлению инженерными данными, технической документацией и 3D моделированию, включая модель данных будущего комплекса АГХК, внесены требования в контракты с подрядчиками и согласованы условия, процедуры и периодичность предоставления данных, а также критерии качества, на основании которых будут приниматься или отклоняться предоставляемые поставщиками оборудования инженерные данные. В марте 2020 года начался проект внедрения платформы СУИД на базе решения Aveva NET, включающий несколько программных модулей, и в декабре 2020 СУИД была введена в эксплуатацию.

В настоящее время СУИД АГХК содержит подробные технические данные о 20 000+ единицах оборудования, количество тегов превышает 100 000, общее количество атрибутов приближается к 3 миллионам. Оценочно это составляет около 15-20% от итоговых наборов данных СУИД, которые будут накоплены к моменту завершения строительства завода. Хранение этой информации в виде разрозненных баз данных, файлов или бумажных спецификаций от разных поставщиков привело бы к невозможности их оперативного поиска и применения для оперативного принятия решений как на этапе строительства завода, так и в процессе его эксплуатации.

# Платформы для построения ЦД

 Как правило, цифровой двойник – это уникальный продукт под конкретное производство, поскольку он должен отражать специфику и особенности конкретного объекта, поэтому разрабатывается и встраивается в ИТ-ландшафт компании на основании инструментов, принятых архитектурными правилами.

 При этом составляющие компоненты ЦД – модели, могут быть разработаны как самостоятельно, так и с использованием платформ моделирования, представленных на рынке. Для каждой предметной области существует свой перечень продуктов.

 Так, например, для моделирования химико-технологических процессов часто используются линейки продуктов компаний Ansys, Aspen (Aspen HISYS, Aspen Plus и т.д.).

 Для построения моделей машинного обучения применяют весь доступный стек библиотек как для классического машинного обучения, так и для современных ансамблевых методов – бустинговых алгоритмов и нейронных сетей.

 Также существуют решения для оркестровки, т. е. для построения композиций из разнородных моделей, используя единую среду разработки, интегрированную со средой развертывания и исполнения моделей.

# Перспективы ЦД

 Основные направления развития определяются новыми методами исследования и моделирования сложных физических и химических процессов, которые раньше не могли быть реализованы либо из-за невозможности детального изучения явления (например, уровень электронных взаимодействий при химических прекращениях), либо из-за слишком высокой вычислительной сложности. Так, например, развитие фемтохимии[[5]](#footnote-5) может пролить свет на некоторые явления, в частности, химического катализа, достоверной модели которых нет до сих пор, что позволит строить модели для процессов, которые являются строительными кубиками цифровых двойников.

 Также, как упоминалось ранее, большие ожидания связаны с гибридным подходом к моделированию, использующим, с одной стороны, методы машинного обучения, основанные на данных, с другой стороны – строгие физико-химических модели.

 В целом текущий век ознаменован развитием кросс-дисциплинарных направлений на стыке наук, и методов, которые позволяют использовать новые подходы к решению задач, в частности появляются успешные примеры применения обучения с подкреплением в промышленности, которые могут быть использованы для задач оптимизации производства.

 Типизация технологии построения ЦД, а, соответственно, снижение стоимости и сроков внедрения одновременно с повышением качества моделей, позволит превратить концепцию Цифрового завода в реальность, как минимум, запустит волну трансформации привычных производств в направлении автономных заводов.

# Заключение

Подводя итоги, можно сказать, что цифровые двойники – перспективная технология, которая уже сейчас позволяет приносить передовым компаниям дополнительные конкурентные преимущества за счет повышения эффективности производственных процессов. При этом ЦД является высокотехнологичным продуктом, разработка которого целесообразна не для всех типов объектов по финансовым соображениям, и при принятии решения о создании ЦД необходимо сопоставлять затраты на его разработку и поддержку и потенциальные финансовые эффекты от внедрения продукта.

Важной предпосылкой быстрой и успешной разработки цифровых двойников является наличие системы управления инженерными данными, которая сама по себе предоставляет значительную ценность для высокотехнологичной производственной компании, обеспечивая быстрый доступ к актуальной информации как для сотрудников, так и для других информационных систем предприятия.

Успешное применение Цифровых двойников на предприятиях в комплексе с СУИД является необходимым условием для перехода в парадигму Цифрового завода наряду с множеством других технологий малолюдного производства, обеспечивающих исключение ручного труда и исполнения рутинных операций людьми на производстве.

# Материалы для дополнительного изучения

1. <https://iiconsortium.org/pdf/IIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf>
2. <https://www.researchgate.net/publication/338869735_Digital_Twin_Values_Challenges_and_Enablers_From_a_Modeling_Perspective>
3. <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>
4. <https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept>
5. <https://www.amrc.co.uk/files/document/219/1536919984_HVM_CATAPULT_DIGITAL_TWIN_DL.pdf>
1. **Процесс** в общем случае – это любая деятельность, сопровождаемая изменением свойств системы. В данной главе под **процессом** будем понимать частный случай – устойчивую и целенаправленную совокупность взаимосвязанных действий, которые по определённой технологии преобразуют входы в выходы для получения заранее определённых продуктов, результатов или услуг, представляющих ценность для потребителя. *Например*, технологический процесс получения пропилена из пропана. [↑](#footnote-ref-1)
2. **Математическая модель** — это приближённое описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное математическим языком. Подобное описание позволяет использовать все богатство математического аппарата для исследования поведения системы. [↑](#footnote-ref-2)
3. *ЦД технологического процесса* и *ЦД производственной установки* в данном случае взаимозаменяемые понятия, потому что установка спроектирована для обеспечения данного процесса и, наоборот, параметры процесса непосредственно связаны с состоянием установки, т. е. температура нагрева является и характеристикой процесса, и показателем установки, которая эту температуру обеспечивает. [↑](#footnote-ref-3)
4. В качестве примера можно взять известную всем функцию – квадратный трехчлен: $f\left(x\right)=x^{2} - 5x + 6$. Эту же функцию можно представить как произведение двух линейных функций $g\left(x\right)=(x 2)(x 3).$ Если представить числа в скобках $– 2, – 3,$ как параметры, то получим ту же функцию в общем виде $g\left(x\right)=\left(x+a\right)\left(x+b\right)$, где a=-2, b=-3. Теперь давайте представим, что мы не знаем значений параметров *a, b*, но у нас есть набор решений $f(x)$ для различных $x$, тогда мы можем подобрать эти параметры *a, b* таким образом, чтобы наша функция $g\left(x\right)$ давала такие же результаты при вычислении с некоторым приближением. Таким образом, используя некоторые данные и универсальные функции, мы подобрали параметры и нашли решение задачи, не зная его истинного представления. [↑](#footnote-ref-4)
5. *Фемтохимия* — раздел физической химии, который изучает [химические реакции](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F) на очень коротких временных интервалах, порядка $10^{-15}$ секунды или фемтосекунд (отсюда и название дисциплины). [↑](#footnote-ref-5)