

Оглавление

Предисловие	4
Сложный инженерный объект.....	6
Инженерия в историческом аспекте	16
Инженерная деятельность. Регламентирующие документы	23
Тренды инженерного прорыва. Технологии и их зрелость	38
Мировые технологические инициативы	49
Цифровой двойник.....	63
Математическое моделирование	77
Реверс-инжиниринг	85
Библиографический список	100

Предисловие

Инженерная деятельность занимает ключевое место в развитии научно-технического прогресса. Учебное пособие отражает суть инженерной деятельности в историческом аспекте и современные тенденции в развитии цифрового общества, знакомит читателя с видами инженерной деятельности, постановками инженерных задач.

Современное производство открывает широкие перспективы перед выпускниками, но в то же время требует грамотных, целеустремленных и всесторонне развитых инженеров, способных осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения инженерных задач. Какие качества необходимы инженеру, чтобы он мог работать успешно в избранной им области? Каковы современные тенденции в области инженерии? В какой области работа инженера наиболее перспективна? Какими нормативными документами регламентируется инженерная деятельность, а также инженерное образование в высших учебных заведениях? Попробуем ответить на эти и другие вопросы в данном пособии.

Общеобразовательные предметы, которые изучают студенты на младших курсах, дают мало сведений о будущей специальности, но любое знание пригодится инженеру в век больших данных, развития генетики, кибернетики, искусственного интеллекта, бионики и др. Подчас трудно определить, как и при каких обстоятельствах придется применять навыки, полученные в университете. В реальной практике инженер применяет все свои знания, накопленный опыт, интуицию для решения стоящих перед ним задач. Он анализирует и сопоставляет, оценивает положительные стороны возможных вариантов решения инженерных задач и выявляет недостатки, а затем вновь уточняет и оптимизирует найденные решения. Предлагаемое учебное пособие раскрывает некоторые аспекты многогранной, творческой и в то же время регламентируемой профессии инженера.

Инженерное образование стоит в приоритете высшего образования. Всё больше бюджетных мест выделяется для инженерных направлений. Однако количество подготовленных инженеров — это лишь одна сторона дела. Общество интересуется прежде всего качеством подготовки молодых специалистов. В Уральском федеральном университете особое внимание уделяется разработке индивидуальных образовательных траекторий и актуализации программы базовой инженерной подготовки, опирающейся на профессиональные стандарты, стандарты подготовки инженерных кадров.

Учебное пособие раскроет суть национальной технологической инициативы, познакомит с развивающимися рынками высоких технологий, трендами инженерного прорыва. В нем раскрываются интересные и заманчивые перспективы будущего инженерной деятельности в самых современных отраслях промышленности. Особое внимание уделяется математическому моделированию и успешным примерам разработки цифровых двойников на основе верифицированных математических моделей. Учебное пособие содержит кейсы инженерных задач, пробуждающие интерес к деятельности инженера. Разбор кейсов полезен и с точки зрения всеобъемлющего реверсивного производства. Показана необходимость познавать тонкости авторского и патентного права.

Повествуя об инженерной деятельности, о качествах, которыми должен обладать квалифицированный инженер, в учебном пособии подчеркивается необходимость глубоких знаний, широкого кругозора, умения работать в команде, убежденности в правильности своей позиции и твердости в ее отстаивании, заботы об окружающем мире, соблюдении инженерной этики и т. п., а главное, показана необходимость постоянного стремления к самосовершенствованию, ведь процесс становления инженера не заканчивается получением диплома, а лишь начинается с этого момента.

Сложный инженерный объект

Для удовлетворения своих материальных запросов на улучшение качества жизни человечество научилось пользоваться природными объектами как источником бесценных ресурсов. Выработка электроэнергии с помощью ветра, солнца, падающей воды¹ производится в промышленных масштабах. Океаны, моря и полноводные реки являются транспортными магистралями для доставки грузов, пассажироперевозок. Искусственно созданные и природные объекты различаются.

Инженерный объект — это искусственное образование, создаваемое силами людей в результате трудовой инженерной деятельности. В качестве примера простого инженерного объекта приведем столовый прибор. Для производства столовых приборов используются достаточно сложные инженерные процессы: конструирование изделия, металлургические процессы получения стали с высокой коррозионной стойкостью, проектирование и изготовление штамповой оснастки, высокоточная финишная обработка и многое другое. Для всех столовых приборов установлены инженерно-технические характеристики и требования к условиям их эксплуатации. На каждый прибор разработана проектная документация, нормативно установлены общие технические условия для столовых приборов в виде ГОСТ Р 51016–97 «Приборы столовые из углеродистой стали и алюминиевых сплавов. Общие технические условия»². При проектировании столовых приборов, их

¹ Чиркейская ГЭС в республике Дагестан — это самая живописная гидроэлектростанция на бурной горной речке Сулак. Самая крупная ГЭС на Северном Кавказе и самая высокая арочная плотина в России. Она построена в узком Чиркейском ущелье, имеет высоту 232 метра. Установленная мощность станции — 1000 МВт. Среднегодовая выработка 2,47 млрд кВт. Дагестан поставляет электричество в соседние Чечню, Ингушетию и Ставрополье. По высоте плотина входит в двадцатку самых крупных в мире.

² ГОСТ Р 51016–97. Приборы столовые из углеродистой стали и алюминиевых сплавов. Общие технические условия. — URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts> (дата обращения: 29.09.2021).

дизайне, подготовке отливок используют цифровые технологии. Однако в то же время столовый прибор не имеет составных компонент, выполняет свою функцию в едином процессе, без подпроцессов и подфункций, технологически практически не обслуживается.

Станок, автомобиль, самолет, аэропорт, вагон, железная дорога, инженерные системы городского хозяйства, предприятия — это уже примеры сложных инженерных объектов. На балансе Уральской горно-металлургической компании (УГМК) стоит значительная площадь, десятки сооружений, объединенных в комплекс с высокой концентрацией разнородных инженерно-технических систем в своем составе (производственных систем, оборудования, инженерных коммуникаций, информационных систем, систем безопасности и иных элементов). Российский горно-металлургический холдинг — крупнейший производитель меди, цинка, угля и драгоценных металлов в стране. Помимо этого, предприятия УГМК производят свинец, селен, теллур, медный и никелевый купорос, другие виды попутной продукции. Основу компании составляет замкнутая технологическая цепочка по меди: от добычи руды до производства готовой продукции на ее основе (медная катанка, прокат, кабельно-проводниковые изделия, теплообменники). Кроме того, холдинг включает в себя и социальные объекты. Заботу о нашем здоровье берет на себя УГМК-медицина. Получить дополнительное профессиональное образование, повысить свою квалификацию можно в Техническом университете УГМК. Спортивные объекты: 8 стадионов, 7 бассейнов, 12 спортивных комплексов, 7 ледовых арен. А знаменитый музей техники известен далеко за пределами Екатеринбурга. Весь этот комплекс объектов составляет один сложный инженерный объект.

Для сложного инженерного объекта характерны интегральные функции: для автомобиля — это перемещение людей и грузов, для электростанции — выработка электроэнергии, для УГМК — замкнутая технологическая цепочка (от добычи сырья до производства готовой продукции). Для ее обеспечения необходимо выполнение большого количества локальных функций. Сложная иерархия обеспечивающих функций отдельных подсистем — это первый признак, определяющий инженерный объект как сложный. Сложный инженерный объект структурирован, состоит из многих подсистем и компонент. При этом некоторые из этих компонент сами по себе представляют собой сложные инженерные объекты. Иерархия компонент сложного инже-

нерного объекта учитывает взаимосвязь функций компонент, способ их интеграции в общую функцию объекта.

Для того чтобы автомобиль выполнял целевую функцию, должны быть обеспечены функции производства энергии в ходе поездки, управляемость движения, выработка энергии, функция передачи усилий на колеса и др. Выполнение этих функций может быть достигнуто путем различных инженерно-технических решений. Двигатель может работать как на жидком топливе и газе, так и на электричестве. При этом технические решения для взаимодействующих систем должны быть совместимыми. Целевая функция сложного инженерного объекта раскладывается на множество составляющих, обеспечивающих ее подфункции. Сложность заключается еще и в том, что такое разложение неоднозначно. Различные варианты отличаются по техническим параметрам — мощности, скорости, потребительским свойствам, комфорту пользователей и даже эстетике.

В случае, когда базовый проект единый, а изделия отличаются деталями, выбираемыми пользователями, говорят про кастомизацию инженерно-технических изделий, то есть адаптацию к выбору пользователей.

При проектировании, инженерном обеспечении и сопровождении работы всего сложного инженерного объекта используется функционально-балансовый подход. Отдельные агрегаты, устройства и системы автомобиля выполняют определенные функции. Тормозная система может быть реализована в большом числе вариантов. От простейшей одноконтурной гидравлической системы с педалью тормоза, управляемой водителем, — до сложных автоматизированных систем с радаром и компьютерами. Есть тормоза гидравлические, пневматические, электрические, механические. Функционально они схожи, а вот конструктивно — различны. Они имеют разницу и в балансе с окружающей средой. Двигательная установка может быть двигателем внутреннего сгорания, твердотопливной, паровой или электрической. Выполняя сходные функции, объекты имеют совершенно разные потоки обмена с окружающей средой. Электрический двигатель потребляет электроэнергию. Материальный баланс, то есть обмен веществом электрического двигателя с внешней средой, практически отсутствует, но есть баланс энергетический. Двигатель любой конструкции отдает полезную механическую энергию другим системам объекта. Поскольку КПД не равно 100 %, двигатель рассеивает значительную долю выработанной энергии на нагрев окружающей среды, иногда — в виде

электромагнитных волн. Наконец, датчики и приборы двигательной установки, а также органы управления формируют входящие и исходящие потоки информации.

Существенной характеристикой сложного инженерного объекта является баланс потоков, им порождаемых. Выделяют материальный баланс, энергетический баланс и информационные потоки. При этом для балансов материальных потоков и потоков энергии выполняются законы сохранения, а для информационных потоков это требование отсутствует. Функционирование инженерных объектов позволяет аккумулировать большие потоки данных. Понятно, что объемы информации зависят от режимов наблюдения. Информацию могут фиксировать как операторы, так и системы датчиков. Отражается такая информация при нормальных и отклоняющихся состояниях систем, подсистем, компонент как в сфере человеческих коммуникаций, так и в цифровых данных. Порождаются потоки информации в ходе жизненного цикла³ сложного инженерного объекта.

Жизненный цикл (ЖЦ) продукции военного назначения регламентируется стандартом ГОСТ Р 56136–2014⁴ и разбивается на 4 стадии:

- разработка изделия — выполняется проектирование конструкции изделия, изготовление и проводятся испытания опытных образцов, осуществляется технологическая подготовка производства;
- производство изделия, предназначенного для поставки заказчикам, при этом оговаривается, что изделие должно быть серийным;
- эксплуатация изделия — реализуется, поддерживается и восстанавливается качество изделия, которое используется по назначению, транспортируется и технически эксплуатируется (все

³ Жизненный цикл изделия — это совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации.

⁴ ГОСТ Р 56136–2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. — URL: https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/catalognational?portal:componentId=3503536e-2ac1-4753-8ed1-09a92fee02de&portal:isSecure=false&portal:portletMode=view&navigationalstate=JB PNS_rO0ABXc5AAZhY3Rpb24AAAABABBjb25jcmV0ZURvY3VtZW50AAZkb2NfaWQAAAAABAAQ3MDY2AAAdFX0VPRl9f (дата обращения: 30.09.2021).

виды хранения, технического обслуживания и ремонта, кроме тех, которые выполняются на условиях временного вывода изделия из эксплуатации, например при капитальном ремонте);

- утилизация — ей в последнее время уделяется особое внимание в связи с растущим истощением ресурсов и источников энергии, а также заботой об окружающей среде. На заключительной стадии осуществляется изменение целевого назначения или уничтожение изделий по причине невозможности или нецелесообразности их дальнейшего применения по основному назначению. Важно обеспечить при этом либо возможность вторичного использования таких изделий, либо дать «новую жизнь» материалам, из которых изготовлено изделие и которые получены при разборке изделия.

Более детально базовый жизненный цикл системы, инженерного объекта описан в национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 57296—2016 «Интегрированный подход к управлению информацией жизненного цикла антропогенных объектов и сред (Описание данных для математического моделирования процессов жизненного цикла. Основные положения)» [1], где его разделяют на двенадцать стадий:

- На первом этапе идет зарождение идеи нового продукта, формирование видения будущего. Пока еще нет объекта, нет даже его прототипа, но есть задумка. На начальной стадии ЖЦ прорабатывается вопрос принципиальной востребованности объекта, определяется кому, зачем и с какими свойствами нужен будущий инженерный объект, его желаемые параметры, потребительские и технические свойства. Результатом этой стадии являются исходные требования к объекту и проработка общей концепции, которая включает в себя описание продукта и общие требования к его свойствам. Это тот этап, на котором выявляются потребности заказчика и проводится аналитический обзор аналогов, оцениваются возможные затраты на изготовление объекта и принимается принципиальное решение о старте проекта.
- На второй стадии ЖЦ идет детальная проработка концепции, проводится концептуальный и экспортный анализ. Задаются общие параметры инженерного объекта, формируются требования потенциальных пользователей, оцениваются ресурсы и возможности. Идея оформляется в виде концептуальной модели инженерного объекта.

- Важным, третьим, этапом жизненного цикла становится организация работы: планирование, формирование команды, создание временной модели. В современном производственном процессе инженерная деятельность опирается на проектный подход. Проекты в основном являются междисциплинарными, и от формирования команды высококвалифицированных кадров с соответствующими знаниями и опытом работы зависит успех проекта.
- Четвертый этап ЖЦ заключается в постановке задачи с учетом сформулированных ранее требований к инженерному объекту. На данном этапе разрабатываются граничные условия, задаются габариты, масса каждой детали, изделия, единицы конструкции или оборудования, подбираются материалы, из которого они будут изготовлены и т. д.
- На пятой стадии ЖЦ разрабатывается эскизный проект, готовится проектная, рабочая и конструкторская документация, изготавливаются чертежи. Продумывается внутренняя структура инженерного объекта, компоновка, фиксируются способы его изготовления, монтажа и функционирования. Проводится детальная проработка изделия — элементов конструкции уже с точными размерами, с выбором способа их соединений. Исследуются все подсистемы, компоненты и комплектующие, которые не должны конфликтовать друг с другом. Проектно-сметная документация включает в себя более широкий набор информации. Помимо эскиза, графических и схематических образов, на данном этапе она содержит пояснительные записки, обоснования расчетов, сметы, принципиальные схемы, например, в виде некой блок-схемы, где стрелками обозначаются связи.
- Шестая стадия ЖЦ — это первый этап верификации модели, на котором выделяется время для осуществления проверки проекта на соответствие требованиям.
- Седьмая стадия ЖЦ непосредственно связывается со стадией производства. Проект находится на этапе реализации. Идет комплектация и заказ необходимых материалов, изделий и комплектующих. К этой же стадии относится и контрактация работ, если требуется привлечение внешних подрядчиков.
- Восьмая стадия ЖЦ отводится на валидацию и верификацию либо натурной, либо цифровой модели объекта. Производит-

ся проверка качества объекта и его соответствия проекту и требованиям.

- Эксплуатация объекта — это девятая стадия ЖЦ. Обычно это самый длительный этап⁵ жизненного цикла инженерного объекта. На этой стадии инженерный объект эксплуатируется, используется, при этом идет его обслуживание и поддержка, при необходимости производится текущий или капитальный ремонт. Объект выполняет свое предназначение, и именно в этот период продукт, изделие, программное обеспечение удовлетворяют потребности потребителей.
- Далее, уже на десятой стадии ЖЦ, происходит накопление знаний. Инженерный объект всесторонне анализируется, данные структурируются, идет формирование библиотек.
- Длительный жизненный цикл инженерного объекта неизбежно ведет к его модернизации. Одиннадцатая стадия ЖЦ отводится на модернизацию, изменения, реновации, обновление модели, смену технологии. Если инженерный объект морально устаревает, то происходит замена устаревших элементов на современные, внедряются новые технологии, обновляется программное обеспечение. На данной стадии ЖЦ требуются новые компетенции от сотрудников, кадры повышают свою квалификацию и проходят переподготовку.
- На двенадцатой, заключительной, стадии по данной классификации фиксируется завершение жизненного цикла инженерного объекта и осуществляется вывод его из эксплуатации: демонтаж, утилизация, консервирование и т. д. На данном этапе проводится оценка состояния объекта, выявление состава и взаимосвязей внутри него, фиксируется возможность повторного использования объекта или его частей. Сложный инженерный объект в своем составе часто имеет достаточно ценные дорогостоящие компоненты, которые могут быть повторно использованы. Вывод из эксплуатации необходим часто и по экологическим причинам. Для радиационно-опасных

⁵ Атомная электростанция рассчитывается на работу в течение 60 лет, 7 лет она строится, а потом еще десятилетиями выводится из эксплуатации. Самолет эксплуатируется порядка 30 лет. Автомобиль служит в среднем 10 лет. А вот время эксплуатации ракеты, выводящей на орбиту космические аппараты, всего несколько минут, а создают ее в течение нескольких месяцев.

объектов использования атомной энергии, химических производств необходимо спланировать специальные процедуры вывода из эксплуатации.

Рассмотрим для примера утилизацию и переработку автомобильных шин. В современном мире, в котором число автомобилей неуклонно растет, утилизация автомобильных шин приобретает большое экологическое и экономическое значение. Изношенные шины являются источником длительного загрязнения окружающей среды. Резина огнеопасна и не подвергается биологическому разложению. Переработка шин предпочтительна потому, что 80 % мирового запаса шин созданы из синтетического каучука, который получают из нефти. А нефть — это невозобновляемый природный ресурс. Около половины использованных шин в мире по состоянию на конец 1990-х сжигалось. Замена захоронения и сжигания технологией утилизации имеет важное экономическое значение, так как способствует сохранению природных запасов ценного сырья, стимулирует развитие ресурсосберегающих технологий. Предприятия по утилизации изношенных покрышек разделяют их на составляющие компоненты:

- вулканизированная оболочка, имеющая сложную структуру;
- металл в виде бортовых колец и тонкой проволоки армирования;
- синтетические текстильные нитки армирования;
- прочие составляющие, такие как клей.

При правильной переработке изношенные шины могут являться сырьем для изготовления различной продукции:

- для новых автомобильных покрышек (до 15–20 %);
- технического пластилина для последующего производства резинотехнических изделий;
- водоотталкивающего покрытия для крыш;
- подрельсовых прокладок;
- напольных ковров и подошвы для обуви;
- колес для инвалидных колясок;
- покрытий для дорог⁶;
- бесшовных покрытий из резиновой крошки для спортивных, игровых и детских площадок;
- тротуарной резиновой плитки и т. д.

⁶ Интересный факт. На 1 км дорожного покрытия уходит 1415 тонн использованных шин.

Требования утилизации есть и в области информационных технологий. Согласно существующим стереотипам, этап переработки и утилизации программного обеспечения у производителей отсутствует, а жизненный цикл завершается этапами ввода продукта в эксплуатацию и его сопровождением. Устойчивая тенденция к интеграции программных продуктов и созданию условий для их обновления и расширения вынуждает производителей программного обеспечения вырабатывать новые подходы к разработке и улучшению информационных проектов. Среди этих подходов — модульная разработка, формирование унифицированных интерфейсов взаимодействия между модулями, заимствование уже готовых продуктов при производстве новых, ведение и контроль всевозможных версий и т. д. Современное программное обеспечение с позиции разработчика — это интеллектуальный продукт, собранный из взаимосвязанных расширяемых компонентов, которые допустимо использовать в других программах. Утилизация программного обеспечения — это необходимый для его разработчика процесс, потому что он дает на выходе артефакты программного обеспечения, которые можно использовать при разработке новых программных продуктов. У конечного пользователя программного продукта отсутствует необходимость в доступе к информационным ресурсам, из которых состоит программное обеспечение, следовательно, процесс утилизации происходит на стороне разработчика. Утилизация — это процесс в целях анализа структуры готового программного обеспечения, выявление артефактов и оценки возможности их повторного использования. Основными методами утилизации программного продукта являются: восстановление продукта, повторное использование, переработка и ликвидация.

На каждой стадии жизненного цикла установлены наборы регламентов и определены инженерно-технические действия. Разрабатываются нормативно-технические требования, фиксируются в проектной и эксплуатационной документации. Обобщенные требования к жизненному циклу существуют для всех сложных инженерных объектов. Они сформулированы в формате международных стандартов и нормативных требований, а также в рамках национального технического законодательства регулирования технической деятельности для жизненного цикла объектов. Внутри жизненных циклов разных объектов эти нормативные требования реализуются поразному в зависимости от структуры и состава объектов, от требований технологий и от тех ви-

дов знаний, которые используются при эксплуатации. Все это порождает индивидуализацию регламентных требований, которые строятся на основе общего законодательства и особых знаний для каждого класса инженерной деятельности. Для инженерных объектов на современном уровне цифровизации появляется возможность провести сквозную индивидуализацию и кастомизацию нормативных и регламентных требований к жизненному циклу конкретного инженерного объекта.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем отличие природных и инженерных объектов?
2. Перечислите признаки, определяющие инженерный объект как «сложный».
3. Какая функция характерна для сложного инженерного объекта?
4. Необходима ли проектная документация на простые инженерные объекты?
5. Одинаков ли жизненный цикл для ракетносителя и авиалайнера?
6. Сколько стадий жизненного цикла выделяют в национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 57296–2016 «Интегрированный подход к управлению информацией жизненного цикла антропогенных объектов и сред (Описание данных для математического моделирования процессов жизненного цикла. Основные положения)» [1]?
7. К каким стадиям жизненного цикла относится конструирование, капитальный ремонт, рециклинг инженерного объекта?
8. Назовите самый длительный по продолжительности этап жизненного цикла сложного инженерного объекта.
9. Какие требования утилизации формируются в области информационных технологий?
10. Расшифруйте аббревиатуры ГЭС, КПД, ЖЦ, ГОСТ.

Инженерия в историческом аспекте

Развитие человечества неразрывно связано с уровнем внедрения высоких технологий. Сложные инженерные объекты, информационные технологии взаимно проникают друг в друга, рождая на стыке различных отраслей прорывные решения. Между собой смешиваются совершенно разные междисциплинарные технологии. Инженерные объекты становятся более сложными, требующими к ним системного подхода.

По определению, данному в национальном стандарте Российской Федерации ГОСТР 57306—2016 «Инжиниринг. Терминология и основные понятия в области инжиниринга» [2], задача в области инженерной деятельности или, как еще говорят, инжиниринга — это требуемое, рекомендуемое или допустимое действие, призванное внести вклад в достижение одного или нескольких результатов процесса или деятельности. Задача современного инжиниринга сведена не столько к изобретению новых инженерных объектов, сколько к творческой компиляции наилучших практик, позволяющей решить конкретную бизнесзадачу с наименьшими затратами ресурсов и с минимальным риском неудачи.

В истории развития техники и технологий выделяют несколько исторических периодов, которые сменяли друг друга.

Первыми специалистами по строительству из камня были инженеры ранней древнеегипетской цивилизации. Дворцы, храмы и гробницы являются символами торжествующей и вечной власти. Самые известные сооружения — это, конечно, пирамиды⁷. Инженеры ран-

⁷Интересный факт. Самая большая пирамида Хеопса 481 фут в высоту, в основании 13 акров фундамента построена из 2,5 миллионов каменных блоков, некоторые из них весят 30 тонн. Доставлялись они по специально проложенной дамбе. Используя веревки, рычаги, ролики, деревянные сани, земляные пандусы и медные зубила, египетские рабочие построили пирамиду по точным и требовательным инженерным стандартам того времени. Низкие ходы пирамиды имеют стыки шириной в одну десятитысячную дюйма. Для справки: 1 фут приблизительно 0,3 м; 1 акр — 4047 м².

ней цивилизации практиковали геодезию, разработали ирригационные системы. Уже в 3300 году до нашей эры египтяне поддерживали систему дамб, каналов и дренажных систем.

Древний Рим был славен знаменитыми инженерами. Римляне строили дороги, акведуки, храмы, арены, используя дешевую рабочую силу рабов. Памятники этих инженерных сооружений являются достопримечательностями Европы, Северной Африки и Ближнего Востока. Римским строителям не зря приписывают значительный вклад в инженерное дело. Ими были изобретены гидравлический цемент, сваебойники, подъемники и деревянные ковшовые колеса, которые использовались для обезвоживания шахт. К древнеримским инженерным сооружениям относится и Аппиева дорога, ставшая первым звеном в дорожной сети. «Все дороги ведут в Рим!».

В средние века достижения в строительстве были воплощены в архитектуре готических соборов, которые образно называют «самыми легкими каменными скелетами». Элегантные, ажурные, каменные, в основном из белого, розового, серого песчаника, конструкции с витражными окнами, остроконечными арками и высокими стенами поддерживаются по бокам контрфорсами⁸. Готические соборы — свидетельство высочайшего уровня инженерных компетенций в строительстве.

В средние века зародились предпосылки к революциям в промышленности. К 700 годам была спроектирована ветряная мельница. Для привода мельниц по всей Европе использовались водяные колеса. Другие механические достижения, появившиеся в Европе в средние века, включают прялку и шарнирный руль для судов, конструкция которого сохранилась до наших дней. Многие технические новинки средневековья появились в Китае, среди которых стоит отметить порох, технологии изготовления бумаги, текстильного производства и литья железа. К 1500 году были изданы книги по геодезии, гидравлике, химии, горному делу и металлургии и другим инженерным дисциплинам.

Наука того времени внесла весомый вклад в развитие промышленности, техники и технологий, который ощущается и по сей день. Леонардо да Винчи — великий ученый-экспериментатор, гений в реше-

⁸ Контрфорс — вертикальная конструкция, представляющая собой опору, предназначенную для усиления несущей стены путем принятия на себя горизонтального усилия распора от сводов.

нии инженерных задач. Коперник Н. заложил основы современной астрономии. Галилей сформулировал научный метод получения знаний и впервые применил телескоп для изучения астрономии. Бойль Р. изучал сжатие и расширение воздуха и других газов. Гук Р. разработал теорию упругости. Ньютон И. открыл тайны света и сформулировал закон всемирного тяготения.

В историческом развитии человечества выделяют переломные моменты, называя их революциями. Научные революции связаны с великими научными открытиями, такими как законы Коперника и Ньютона; квантовая теория Планка; открытие атома Бором; теория относительности Эйнштейна и другие. В развитии инженерии выделяют индустриальные или промышленные революции, которые привязаны к великим открытиям в инженерной деятельности, среди которых особое место занимают паровой двигатель, электричество, электронные вычислительные машины и искусственный интеллект.

Первая промышленная революция произошла в XVIII веке, когда для механизации производства начали использовать энергию воды и пара. Достигнут прогресс в горнодобывающей промышленности, производстве и транспорте.

Торричелли Э. первым измерил атмосферное давление в 1643 году, что позволило в 1711 году английскому изобретателю Т. Ньюкомену создать первую в мире пароатмосферную машину. Один из первых практических паровых двигателей атмосферного давления использовался для откачки воды из британских шахт в течение почти 75 лет, прежде чем он был заменен более эффективным двигателем Дж. Уатта.

В России И. И. Ползунов в 1766 году построил паровую машину высотой с 3-этажный дом. Машина работала на Барнаульском заводе и применялась для приведения в движение воздухоудных мехов при сереброплавильных печах. КПД пароатмосферной машины составляет 0,33 %. В машине И. И. Ползунова не было золотника, то есть не было возможности распределять потоки пара.

Д. Уатт пароатмосферную машину преобразовал в паровую. Мощность⁹ паровой машины была увеличена в пять раз, что дало 75 %-ную

⁹ Интересный факт. Как единица измерения мощности современных двигателей первым появилось понятие лошадиная сила. Когда паровой машиной стали заменять лошадей на фабриках, водокачках и в прядильнях, английский фермер установил у себя паровую машину, чтобы качать воду. Он проверил, сколько воды с помощью одной лошади насос может накачать за одну секунду в бак на высоте од-

экономии в себестоимости угля. КПД¹⁰ паровой машины 3–4 %. Паровая машина является первым тепловым двигателем, который мог крутить колесо мельницы или фабричного станка и освободил производство от водяных колес на реках. К 1800 году пятьсот двигателей Уатта использовались в Британии для откачивания воды из шахт и приведения в движение машин на металлургических заводах и ткацких фабриках.

Дальнейшие эксперименты с паровыми двигателями привели к созданию пароходов, паровозов, паромобилей и даже паросамолетов.

Вторая промышленная революция стартовала в конце XIX века с началом применения электричества в качестве источника энергии для серийного производства.

Отметим основные открытия, внесшие весомый вклад в развитие электроэнергетики. Вольт А. изобрел первую электрическую батарею. Дэви Х. открыл электромагнетизм и дуговой свет. Фарадей М. продемонстрировал процесс магнитной индукции. Эдисон Т. А. изобрел практичную лампу накаливания и обнаружил, что лампы могут быть соединены параллельно, позволяя выключать одну или несколько ламп без отключения всей системы. Якоби Б. С. изобрел электродвигатель постоянного тока. Доливо-Добровольский М. О. описал систему трехфазного тока. Н. Тесла получил патенты на асинхронный двигатель и новую многофазную систему переменного тока.

История развития электрической тяги начинается с 30–40-х годов XIX века в связи с изобретением электродвигателя. В 1838 году впервые в мире была осуществлена перевозка людей посредством электрической тяги. По реке Неве было пущено судно-электроход, гребное колесо которого приводилось в движение электродвигателем Якоби, питаемым от батареи гальванических элементов. Электроход достигал скорости 4 версты¹¹ в час.

ного фута. Получилось 470 фунтов воды. Работу, произведенную за секунду, назвали мощностью в одну лошадиную силу. Лошадиная сила как мера мощности применялась и для автомобильных моторов. В последние десятилетия мощность определяют в ваттах (Вт). Только автомобилисты остались верны прежней единице измерения: 1 л. с. = 735,5 Вт.

¹⁰ Для сравнения: КПД двигателя внутреннего сгорания может достигать 30 %.

¹¹ Верста — русская единица измерения расстояния, равная пятистам саженьям или тысяче пятистам аршинам. Соответствует нынешним 1066,8 метрам.

Электрическая энергия стала использоваться во всех сферах деятельности человека. Телефоны, электрическое освещение устанавливались не только на предприятиях, но и в домах. Электричество использовалось для движения поездов и трамваев, для запуска машин новых отраслей промышленности. Изобретение конвейера сделало производство массовым.

В 1771 году создано первое инженерное общество в Англии. В 1818 году группа молодых английских инженеров основала Институт гражданских инженеров, а инженер признается как профессия. Русское техническое общество — общероссийское научно-техническое общество основано в 1866 году в Санкт-Петербурге для содействия развитию техники и промышленности в России. В Америке к 1908 году было образовано пять видных инженерных обществ, представлявших гражданское, механическое, электрическое, химическое и горно-металлургическое машиностроение.

Сложность развивающегося математического аппарата и объемы вычислений в инженерных расчетах привели к необходимости привлечения к инженерным расчетам вычислительной техники. Приведем примеры, показывающие возможные типовые ошибки «ручного» счета даже, казалось бы, в простых расчетах.

Кейс 1. Два инженера решают одну и ту же систему уравнений:

$$\begin{cases} \sqrt{2}x + \sqrt{3}y = \sqrt{3}, \\ 2x + \sqrt{6}y = 2\sqrt{6}, \end{cases}$$

но при этом получают разный результат вычислений. Причина в том, что первый инженер округляет иррациональные числа до первого знака после запятой, а второй — до второго знака после запятой.

Задание. Решите системы уравнений и убедитесь в том, что решение данной системы уравнений с иррациональными коэффициентами зависит от способа перевода иррациональных чисел в вещественные. Сравните ответы.

Кейс 2. Решая систему уравнений

$$\begin{cases} x + 10y = 11,01, \\ 100x + 1001y = 1101, \end{cases}$$

инженер округлил все коэффициенты до целых чисел:

$$\begin{cases} x + 10y = 11, \\ 100x + 1001y = 1101. \end{cases}$$

Задание. Решите системы уравнений и сравните полученные результаты вычислений, оценив влияние внесенных, на первый взгляд несущественных, изменений в постановку задачи.

По результатам решения приведенных выше кейсов можно сделать вывод о том, что при выполнении инженерных расчетов из-за промежуточного округления результатов накапливается вычислительная ошибка.

Третья промышленная революция началась во второй половине XX века. Создание полупроводников, электронных вычислительных машин, персональных компьютеров и всемирной паутины привело к автоматизации, всеобщей компьютеризации.

Примитивная передача сигналов была заменена современными сетями связи. С момента изобретения транзистора в 1947 году полупроводниковые приборы в значительной мере заменили вакуумные трубки в качестве усилителей электронных сигналов. Транзистор и полупроводниковый диод привели к значительному уменьшению размеров электронного оборудования. Появление недорогих интегральных схем, массово производимых на крошечных кремниевых чипах, внесло революционные изменения в электронный дизайн. Миниатюризация и в то же время надежная и быстрая передача сигналов по цепям привели к развитию более быстрых коммутационных схем и цифровых вычислительных машин. Основные движущие силы в технологическом развитии — это широкое распространение вычислительной техники, прежде всего персональных компьютеров, всеобъемлющее проникновение Интернета, массовое применение персональных портативных коммуникационных устройств¹².

В XXI веке разворачивается четвертая индустриальная революция. Ее предвестники — маленькие и мощные сенсоры, искусственный ин-

¹² Интересный факт. Выделяют три информационных революции. Первая была вызвана изобретением письменности, вторая связана с началом книгопечатания. Третья информационная революция, характеризующаяся цифровизацией, появлением глобальной информационной компьютерной сети Интернет, качественно меняет все сферы жизнедеятельности человека.

теллект, большие данные. В прогнозах массовое внедрение киберфизических систем в производство, всеобщая цифровизация.

В 2018 году в России утверждена национальная программа «Цифровая экономика», в который входят 6 федеральных проектов с общим финансированием в 1,6 трлн рублей: нормативное регулирование цифровой среды; информационная инфраструктура; кадры для цифровой экономики; информационная безопасность; цифровые технологии; цифровое государственное управление. В 2017 году Правительство Российской Федерации утвердило первую дорожную карту по развитию Национальной технологической инициативы (НТИ). В качестве наиболее перспективных направлений отмечены цифровое проектирование и моделирование, новые материалы, аддитивные технологии, промышленный интернет и робототехника. По мнению авторов документа, к 2035 году в России должны быть сформированы новые глобальные рынки, которые позволят нам занять лидирующие позиции в технологической сфере.

Вопросы для самоконтроля

1. Сколько промышленных революций выделяют в истории развития техники и технологий?
2. Какие сложные инженерные объекты относятся к эре первой промышленной революции?
3. Перечислите имена великих ученых, внесших значительный вклад в развитие второй промышленной революции.
4. Какую промышленную революцию характеризует бурное развитие электронно-вычислительных машин?
5. Частью концепции какой промышленной революции является понятие цифрового производства?
6. В какой стране впервые заговорили о начале четвертой промышленной революции?
7. Чем отличаются инженерные задачи цифрового производства от инженерных задач второй промышленной революции?

Инженерная деятельность. Регламентирующие документы

Под термином деятельность понимается любая работа, выполняемая человеком или группой людей. Понятие деятельности до сих пор уточняется философами в различных словарях. В Национальном стандарте [2] деятельность определена как совокупность действий, в результате которых расходуются время и ресурсы и выполнение которых необходимо для достижения или содействия достижению одного или нескольких результатов.

Деятельность людей можно разделить на виды. Политической деятельностью занимаются депутаты, советники Президента, мэры. Литературная деятельность присуща писателям, поэтам, сценаристам; изобразительная деятельность — художникам, скульпторам, костюмерам. Во всех сферах не обходится без рабочей деятельности. Повара, закройщики, слесари, плотники работают на благо человека. Есть виды деятельности, для которых необходимым условием является наличие высшего образования, в том числе инженерная деятельность.

Миссия инженера — это создание инженерных объектов, необходимых для обеспечения жизнедеятельности и повышения качества жизни человека и общества, с рациональным использованием природных ресурсов и грамотным применением естественнонаучных знаний и практического опыта.

Зачастую инженерная деятельность ошибочно сужается по функционалу и сводится к изобретательской деятельности. Изобретатель устанавливает связи между всеми основными компонентами инженерной реальности — функциями инженерного объекта, природными процессами и условиями. При этом находятся, описываются, рассчитываются, исследуются характеристики инженерного объекта. Изобретения являются результатом систематических исследований на базе фундаментальных наук и опыта, а не только озарения и вдохновения. Для активизации мышления и воображения используются неалгоритми-

ческие и алгоритмические методы. Неалгоритмические методы в своей основе подразделяются на два больших класса:

- метод проб и ошибок;
- методы перебора вариантов.

К ним относят мозговой штурм, морфологический анализ и другие. В основе алгоритмического подхода лежит методология Г. С. Альтшуллера¹³ об общем развитии технических систем, происходящем по законам диалектики. Специалисты в области истории науки и техники на примере Т. А. Эдисона¹⁴ развеяли миф «о неотесанном, но гениальном изобретателе и об изобретательстве как о божественном даре». Записные книжки Т. А. Эдисона свидетельствуют о том, что он постоянно учился, познавал суть достижений науки. «Фабрика изобретений» в Менло-Парке является оснащенной самым передовым на тот момент научным оборудованием лабораторией, в которой работали квалифицированные ученые.

Инженерная деятельность А. С. Попова¹⁵ была, скорее, конструкторской, чем изобретательской. Направленность на создание и совершенствование различных конструкторских схем радиотехнических устройств позволила ему создать экономичные, технологичные и удобные для эксплуатации радиотехнические конструкции. А вот изобретательская деятельность не всегда доходит до реализации в отличие от конструкторской. Серийное производство технических изделий заключается в создании, испытании и обработке опытных образцов различных вариантов будущего инженерного объекта, выборе из них оптимального для заказчика, и в разработке технической документации: руководств к изготовлению на производстве, к режимам эксплуатации, к утилизации и др. Задача конструирования состоит в том, чтобы, опираясь на связи, установленные в изобретательской

¹³ Генрих Саулович Альтшуллер (1926–1998) — советский писатель-фантаст и изобретатель, автор ТРИЗ.

¹⁴ Томас Алва Эдисон (1847–1931) — изобретатель и предприниматель, получивший в США 1093 патента и около 3 тысяч в других странах мира; создатель фонографа; усовершенствовал телеграф, телефон, киноаппаратуру, разработал один из первых коммерчески успешных вариантов электрической лампы накаливания. Т. А. Эдисон предложил использовать в начале телефонного разговора слово «алло».

¹⁵ Александр Степанович Попов (1859–1905) — русский физик и электротехник, профессор, изобретатель в области радиосвязи.

деятельности, определить и рассчитать конструктивное устройство инженерного объекта. Конструирование позволяет инженеру удовлетворить всевозможные требования к объекту и найти все необходимые компоненты, способы их сочленения для обеспечения наперед заданных свойств, параметров и характеристик. Изобретение, конструирование, как и любая инженерная деятельность, опираются на расчеты. И здесь не обойтись без специальных знаний в области профильных технических наук, а также естественно-научного фундамента из математики, физики, механики, химии и других наук. Для коммуникации между специалистами из различных сфер инженерной и рабочей деятельности разрабатываются особые знаковые средства: обозначения на схемах, принципы построения чертежей.

В инженерной деятельности постепенно выделяется направление, тесно связанное с проработкой общей идеи, замысла создаваемой системы — проектирование. В современной инженерии исходная задача решается проектным способом. В проекте без обращения к опытным образцам имитируются и задаются функционирование, строение и способ изготовления инженерного объекта.

Так кто же такой инженер? *Инженер* — это профессия, в которой знания математических и естественных наук, полученные в результате изучения, опыта и практики, применяются для разработки способов экономического использования материалов и сил природы на благо человечества. Согласно стандарту [2] инженер — это специалист, профессионально занимающийся инженерным делом. *Инженерное дело* — это профессиональная деятельность, связанная с применением систематического, строгого, количественного подхода для создания и применения информации о физических объектах, системах, процессах и их взаимодействии в целях создания новых сущностей. *Сущность* — это материальное или идеальное образование, которое существует само по себе, фактически или потенциально, конкретно или абстрактно, физически или нет. Сущность не обязательно имеет материальное существование. Инженер создает и участвует в материализации новых образов материального искусственного мира на основе уже известных знаний. Инженерная деятельность тесно связана с научной деятельностью, которая готовит базу знаний, дает массу задумок и идей, а также и с деятельностью рабочих, которые материализуют образы в инженерные объекты. Инженер разрабатывает проекты, конструирует, но не только. Из этапов жизненно-

го цикла сложного инженерного объекта вытекают и другие важные виды инженерной деятельности:

- изготовление экспериментальных образцов, испытания;
- технологическое обеспечение производства;
- производство одиночное, серийное, массовое, кастомизированное;
- эксплуатация, модернизация, утилизация, ликвидация;
- организация вышеперечисленных процессов, управление вышеперечисленными процессами;
- сбыт, контроль и надзор за качеством, безопасностью и экологичностью и много других направлений.

Все пронизано «цифрой», информационные технологии все глубже внедряются во все сферы инженерной деятельности.

В современном мире в инженерной деятельности выделяют инжиниринг. Сферы инжиниринга условно можно разделить на системный, программный инжиниринг, процессная, строительная деятельность, технологическая инженерия, биотехнология и нанотехнология. У специалистов из отдельных сфер деятельности разные точки зрения на содержание инжиниринговой деятельности. В стандарте [2] перечислены некоторые выводы из исследований видов и форм инжиниринговой деятельности:

- инжиниринг — это вид интеллектуальной деятельности, который предполагает в том числе решение творческих задач. Однако чаще всего задача инжиниринга сведена не столько к изобретению новых объектов, процессов, систем, сколько к творческой компиляции наилучших практик, позволяющей решить конкретную бизнес-задачу с наименьшими затратами ресурсов и с минимальным риском неудачи;
- инжиниринг — это не просто проектирование, конструирование, расчетно-графические работы. Содержание инженерии — это создание новой интеллектуальной сущности, а также информации. Инжиниринг не столько создает новую информацию, сколько уменьшает неопределенность, связанную с реализацией замысла проектировщика;
- предметом инжиниринга является не сам объект, а интеллектуальная деятельность по созданию этого объекта, организация взаимодействия сторон, участвующих в создании объекта. Центр тяжести инжиниринговой деятельности находится

не в сфере проектирования, конструирования, строительства, программирования, а в сфере организации этих процессов;

- инжиниринг — это не отдельная особая сфера деятельности, а особое сочетание известных видов деятельности, позволяющее получить новый, синергетический результат;
- невозможно говорить и об отдельной профессиональной деятельности в области инжиниринга ввиду того, что эта деятельность включает в себя знание технических дисциплин, дисциплин менеджмента, правовых и экономических дисциплин;
- инжиниринг как вид экономической деятельности представляет собой прежде всего оказание услуг.

Проведенные исследования, их результаты и выводы позволили сформировать следующее обобщающее определение понятия *инжиниринг* — это инженерно-консультационная деятельность, содержанием которой является решение инженерных задач, связанных с созданием или совершенствованием объектов. Предметом инжиниринга является не продукция, не проектирование и не производство продукции, а интеллектуальный процесс решения творческих инженерных задач, связанных с проектированием, организацией, управлением, оцифровыванием процессов производства.

Инженерное дело опирается на научные открытия. Благодаря деятельности инженеров человечество получает пользу от научных исследований. Например, основные положения теории транзисторов были разработаны группой физиков. А то, что миллионы транзисторов работают в аппаратуре самого различного назначения — вот это заслуга инженеров.

Цель инженерной деятельности заключена в создании инженерных объектов, технологий и эффективного их использования в системе общественного производства. Целями инженерной деятельности являются изобретение, разработка, создание, внедрение, ремонт, обслуживание, улучшение техники, материалов или процессов. Инженерная деятельность аккумулирует производственный опыт и использует научные знания, отличается высокой степенью интеллектуального творчества, протекает преимущественно в социальной среде и зависима от внешних, социокультурных факторов.

Все виды инженерной деятельности попадают в Российской Федерации под действие федерального закона «О техническом урегули-

ровании» от 2002 года¹⁶. Закон регулирует отношения, возникающие при разработке, принятии, применении и исполнении обязательных и добровольных требований к объектам технического регулирования и оценке их соответствия установленным требованиям. Объектами технического регулирования является продукция, связанные с ней процессы проектирования, производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также выполнение работ и оказание услуг. Требования к объектам технического регулирования закрепляются техническими регламентами, стандартами и сводами правил. Техническая (проектная, конструкторская, технологическая, эксплуатационная) документация должна обеспечить людям возможность выполнения работ и достижения целей, в ней отраженных. Это возможно только при применении четких, ясных, единообразных норм и правил, касающихся требований к содержанию, построению, терминологии, языку, порядку разработки, согласования и утверждения технической документации. По существу, это — необходимость применения систем документации. Такие системы существуют в большинстве развитых стран.

В Российской Федерации разработана «Единая система конструкторской документации» (ЕСКД), включающая 1,5 сотни стандартов (рис. 1), в которых прописан порядок единых обозначений, единого представления графической информации. В строительной сфере инженеры руководствуются Системой проектной документации для строительства (СПДС). Принципы, нормы и правила в области создания новых производственных процессов определяет Единая система технологической документации (ЕСТД). В частности, сюда относятся принципы и правила разработки и построения технологических регламентов. Качество и безопасность продуктов, услуг, работ обеспечивается национальными (ГОСТ) и международными (ISO) системами стандартов, а также общими межотраслевыми правилами безопасности — техническими регламентами. Инженерная деятельность регулируется, как правило, нормами всех этих систем. Данные стандарты встраиваются в системы автоматизированного проектирования (САПР). Активно идет разработка стандартов для цифровой экономики.

¹⁶ Закон «О техническом регулировании». — URL: <https://rsnadzor.ru/f/184fz.pdf> (дата обращения: 29.09.2021).

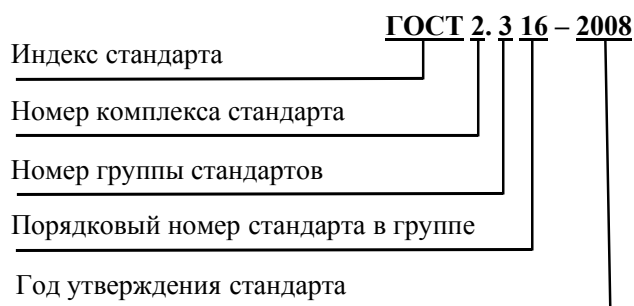


Рис. 1. Кодировка государственных стандартов

Государство законодательно устанавливает систему единиц в качестве предпочтительной или обязательной для использования в стране. В России действует ГОСТ 8.417–2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин»¹⁷, предписывающий обязательное использование единиц СИ. В нем перечислены единицы физических величин, разрешенные к применению, приведены их международные и русские обозначения, а также установлены правила их использования. Основные единицы Международной системы единиц СИ — это семь физических величин: длина, масса, время, сила электрического тока, термодинамическая температура, количество вещества и сила света. Единицы измерения для них: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела соответственно.

Кейс 3. Летом 1983 года самолет Boeing 767 совершал перелет Монреаль—Оттава—Эдмонтон. На борту находились 61 пассажир и 8 членов экипажа. В результате ошибки, допущенной при заправке самолета, у него внезапно закончилось топливо. Двигатели остановились, все системы были обесточены, работали только автономные аварийные приборы. Нужно было срочно принимать решение о посадке самолета. Было понятно, что лайнер не сможет долететь до ближайшего аэропорта. Один из членов экипажа знал местность, и решили посадить самолет на авиабазе Гимли (рис. 2), где этот пилот раньше проходил службу. Но никто не знал, что базу закрыли, а посадочную полосу пе-

¹⁷ ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. — URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/8435/> (дата обращения: 04.10.2021).

ределали в гоночную трассу. Оказалось, что именно в этот день проводились соревнования. Через 17 минут самолет остановился прямо перед зрителями.



Рис. 2. Экстренная посадка самолета на гоночную трассу в 1983 году¹⁸

Какова же причина аварии? Заправщики самолета перепутали единицы измерения. С 1970-го года Канада переходила с имперской системы мер на метрическую. Процесс этот протекал медленно, но на Boeing 767 уже использовались килограммы и метры. А на всех остальных все еще были фунты и галлоны. В итоге при расчете необходимого объема топлива (при исходных данных — температуре и уровне топлива в баке) вместо плотности, измеряемой в килограмм на литр, взяли величину фунт на галлон.

Задание. Если, необходимо было заправить двадцать тысяч литров, сколько залили литров топлива при заправке самолета в тот злополучный день?

Кейс 4. В 1999 году использование инженерами разных систем единиц измерения стало причиной потери сразу двух американских космических аппаратов — Mars Climate Orbiter и Mars Polar Lander. Марсоходы оказались слишком близко к Марсу, на высоте 57 км вместо 226 км. В ходе расследования причин этих двух инцидентов выясни-

¹⁸ Сели все. — URL: https://lenta.ru/articles/2019/08/16/extraordinarylanding/?referrer=other__3 (дата обращения: 01.11.2021).

лось, что часть проектировщиков в качестве единицы измерения силы использовала ньютон (метрическая система), а часть — фунт-силу (единица английской системы мер). Это повлекло за собой ошибку в управлении аппаратами и их гибель. В 2007 году NASA объявило о полном переходе на метрическую систему.

Задание. Переведите один ньютон метрической системы СИ в единицы фунт-сила английской системы мер.

Во многих странах закреплено звание «профессионального инженера»: Professional Engineer в Японии, США, Канаде, Южной Кореи, Южной Африке, Сингапуре и Chartered Engineer в Ирландии, Великобритании, Австралии, Новой Зеландии. Оно означает, что такой инженер способен вести самостоятельную регламентированную профессиональную деятельность и имеет лицензию от одного или нескольких правительственных органов на предоставление профессиональных инженерных услуг в качестве независимого квалифицированного практика. Существуют международные регистры профессиональных инженеров. На сегодняшний день три международных организации в мире ведут учет профессиональных инженеров, что способствует международному признанию инженерных квалификаций:

- Форум мобильности инженеров (Engineers Mobility Forum, EMF);
- Регистр инженеров стран АПЕС (APES Engineering Registe);
- Европейская федерация национальных инженерных организаций (Federation Europeenned' Associations Nationalesd' Ingenieurs, FEANI).

Звание профессионального инженера указывает, что специалист использует в своей деятельности инновационный и творческий подход, разрабатывает и внедряет передовые технологии и использует их в своей работе. При этом профессионал имеет фундаментальные знания, применяя их для разработки и внедрения новейших технологий, использует современные методы проектирования. Деятельность профессионального инженера проявляется на стыке различных областей знаний и носит высокоинтеллектуальный характер. Немаловажным компонентом в работе является использование оригинальных, творческих подходов и суждений, способность осуществлять административное и техническое руководство персоналом. Выделим основные критерии большинства стран, которые отображены в международ-

ных стандартах по регистрации специалиста в качестве профессионального инженера:

- высшее образование по аккредитованной инженерной программе;
- лицензия на профессиональную деятельность;
- опыт от 3 лет практической инженерной деятельности;
- сданные профессиональные экзамены;
- непрерывное профессиональное совершенствование, повышение квалификации;
- знание и следование кодексу профессиональной этики.

В России разработан проект Федерального закона Российской Федерации «О профессиональных инженерах в Российской Федерации».

Целями Федерального закона являются:

- комплексное правовое урегулирование правоотношений в области инженерной деятельности;
- создание необходимых правовых, административных и экономических механизмов, способствующих развитию инженерной деятельности в РФ и повышению качества создаваемых инженерных объектов;
- повышение роли и статуса инженера, инженерии, инженерной деятельности и инженерной профессии в РФ;
- защита общества от негативных последствий, возникающих в результате непрофессиональных действий в области инжиниринговой деятельности.

Осуществляя инжиниринговую деятельность, профессиональный инженер участвует в разработке всех разделов документации для проектирования и конструирования, строительства, производства и эксплуатации инженерных объектов; подписывает проектную, конструкторскую, технологическую документацию; запрашивает и получает сведения и исходные документы, необходимые для предпроектных исследований, проектирования, конструирования и строительства инженерных объектов; подтверждает, декларирует соответствие инженерного решения требованиям технических регламентов, установленным требованиям безопасности, в случаях, когда это требуется по действующему законодательству; осуществляет защиту согласованных с заказчиком инженерных решений при их экспертизе и рассмотрении в соответствующих органах; несет ответственность за объем и качество выполненных работ привлеченных им соисполнителей; представля-

ет и защищает интересы заказчика по его поручению при заключении договоров подряда; осуществляет контроль над качеством и объемом выполняемых инженерных работ; является, по поручению заказчика, его ответственным представителем при приемке инженерного объекта в эксплуатацию.

Требование к профессиональным инженерам — владение универсальными, общепрофессиональными и профессиональными компетенциями. Среди компетенций следует отметить способность анализировать инженерные задачи; проектировать и разрабатывать инженерные решения; оценивать инженерную деятельность; принять ответственность за инженерные решения; организовать инженерную деятельность в коллективе; соблюдать этические нормы инженерной деятельности; коммуницировать; обучаться в течение всей жизни; обладать здравомыслием; соблюдать законность и нормативность; заботиться об общественной безопасности инженерной деятельности.

Инженерия — это воплощение системы принципов, методов и навыков, которые не могут быть усвоены при простом изучении. Нужен опыт и профессиональная практика, чтобы по праву носить звание профессиональный инженер. Знания инженера должны быть подкреплены профессиональным суждением. Решения инженерных задач должны удовлетворять противоречивым требованиям, и предпочтительное оптимальное решение не всегда является результатом четкого применения научных принципов или формул. Инженер должен взвесить конфликтующие ограничения и вынести суждения, основанные на знаниях и опыте, в поисках наилучшего или оптимального решения.

В поисках ответов на проблемы инженеры используют материалы и силы природы. Существует почти неограниченный список материалов, как природных, так и искусственных, которые инженеры могут использовать для создания своих конструкций. Они выбирают подходящие материалы на основе доступности, стоимости и физических свойств (вес, прочность, долговечность, эластичность и т. д.), но при этом должны думать и о ресурсосбережении, экологической безопасности. Инженер имеет доступ ко всем источникам энергии: нефти, углю, газу, ядерному расщеплению, водным ресурсам, солнечному свету и ветру. Эти источники сильно различаются по стоимости, безопасности и технологической сложности. Инженеры признают, что запасы материалов и энергии на земле не безграничны и нужно заботиться не только об использовании этих ресурсов, но и об их сохра-

нении. Это включает в себя переработку и повторное использование существующих материалов, восстановление вместо замены. Современная инженерная деятельность включает в себя поиск энергоэффективных решений и поиск новых источников энергии для замены тех, которые истощаются.

Вплоть до конца 1960-х годов экономика стояла на первом месте при планировании инженерной деятельности. Мало кто беспокоился о вредном воздействии человеческой деятельности на окружающую среду. Только в 1969 году был принят Закон о национальной экологической политике. Законодательство требует подготовки отчета о воздействии на окружающую среду для финансируемых из федерального бюджета проектов. Принятие этого закона зафиксировало осознание необходимости для инженеров взвешивать негативные последствия своих проектов и выгоды. Инженерная деятельность должна приносить пользу человечеству, но осуществляться с должным пониманием и заботой о возможном вредном воздействии технологий на людей и окружающую среду. Инженеры должны объективно оценивать свои проекты и отвечать за их безопасность.

Практически существует много разных направленностей в инженерной деятельности, определяемых той областью знаний, которая необходима инженеру для решения основных задач. Инженеры-химики разрабатывают способы химического превращения материалов, выделения бензинов из нефти; разрабатывают технологию производства пластических материалов, цемента, масел, резины, взрывчатых веществ, красителей и пр. Инженеры-строители участвуют в проектировании и строительстве основных гражданских сооружений — шоссе, мостов, плотин, каналов, систем водоснабжения и канализации, аэропортов, причалов и зданий различного назначения. Инженеры-электрики разрабатывают способы получения, преобразования и применения электрической энергии. Они конструируют электродвигатели, генераторы тока, линии электропередач, средства связи и многие другие приборы, аппараты и системы. Инженеры-механики создают системы, преобразующие энергию для совершения полезной механической работы. К таким системам относятся двигатели, турбины, а также механизмы для преобразования одних видов движения в другие. Инженеры-металлурги — создатели способов выплавки и обработки металлов. Инженеры IT — создают информационные системы: накапливающие, преобразующие, передающие и обрабатывающие ин-

формацию. Они занимаются разработкой, сопровождением и внедрением различных информационных систем.

Независимо от направленности инженерной деятельности основная задача всех инженеров одинакова — создавать системы, преобразующие материалы, энергию, информацию в более полезную форму. При всех инженерных специальностях нужно владеть основными приемами работы и иметь профессиональные познания. Министерством труда и социальной защиты РФ разработаны профессиональные стандарты инженерной деятельности. Реестр профессиональных стандартов Минтруда России включает в себя документы, в которых перечислены основные квалификационные требования и трудовые функции работников. Ознакомиться с ними можно более подробно на сайте Минтруда России [3].

На основе профессиональных стандартов, а также Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования¹⁹ разрабатываются образовательные программы в вузах.

Уральскому федеральному университету (УрФУ) одному из немногих предоставлено право устанавливать собственный образовательный стандарт. Опираясь на Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования и профессиональные стандарты в 2020 году в университете был утвержден ряд самостоятельно устанавливаемых образовательных стандартов (СУОС) [4]. В том числе стандарт по широкому спектру инженерной деятельности «Инженерное дело, технологии и технические науки». В этом стандарте прописаны компетенции, которые бакалавр должен продемонстрировать при выпуске из университета. На первых курсах формируются в основном универсальные и общепрофессиональные компетенции, указанные в стандарте. Из них вытекают профессиональные компетенции, результаты обучения, прописанные в образовательных программах каждого направления инженерной деятельности. Компании охотно берут выпускников Уральского федерального университета даже без стажа работы. По данным кафедр, 90 % выпускников инженерных направлений находят работу по специальности в течение 3 месяцев после получения диплома. Квалифицированные специалисты необходимы практически во всех сферах жизнедеятельности человека. Компетен-

¹⁹ Портал Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования. — URL: <http://fgosvo.ru/> (дата обращения: 30.09.2021).

ции, полученные в УрФУ, помогают выпускникам в карьерном росте. Многие выпускники УрФУ ведут свой бизнес, занимают руководящие должности.

По данным Организации экономического сотрудничества и развития 32 % существующих профессий изменятся под воздействием технологического прогресса. Поэтому лучше заранее подготовиться к переменам и задуматься о том, чтобы освоить востребованную профессию. Квалифицированные инженеры имеют стабильно высокий доход. Опытные инженеры ценятся за рубежом и имеют возможность работать в лучших компаниях мира. Профессия инженер подходит для творческих личностей, которые имеют множество интересных идей и не боятся реализовывать их. Современные инженеры — это не узкие специалисты, знания и навыки которых пригодятся в одной предметной области. Профессионал должен не только досконально разбираться в своей сфере, но и обладать развитыми исследовательскими навыками, уметь работать в программах автоматизированного проектирования и владеть иностранным языком, как минимум, на уровне чтения технической документации. Квалифицированные специалисты обязательно найдут работу и будут востребованы на рынке труда.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается миссия инженера?
2. Раскройте суть следующих понятий: инженер, инженерная деятельность, инженерия, инжиниринг.
3. Какие виды инженерной деятельности попадают в Российской Федерации под действие федерального закона «О техническом регулировании» от 2002 года?
4. Расшифруйте следующие аббревиатуры: ЕСКД, САПР, СУОС, СПДС, ЕСТД.
5. В каких странах закреплено звание профессионального инженера?
6. Перечислите основные критерии, которые отображены в международных стандартах по регистрации специалиста в качестве профессионального инженера.

7. Какие разделы содержит профессиональный стандарт Минтруда России?
8. В каких документах прописаны требования к профессиональной деятельности бакалавров?
9. Какие компетенции зафиксированы в самостоятельно устанавливаемом образовательном стандарте Уральского федерального университета по широкому спектру инженерной деятельности из области «Инженерное дело, технологии и технические науки»?

Тренды инженерного прорыва. Технологии и их зрелость

В современном обществе постоянно обновляется информация, накапливаются знания. Для отслеживания большого объема информации и получения актуальных знаний об инженерии необходимо иметь представление о ключевых трендах развития промышленности. Рассмотрим трансформации, происходящие в области инженерной деятельности, выделим тренды, занимающие прочное место в промышленном производстве и определяющие направления инженерной деятельности.

В 2018 году Президиум Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам утвердил Национальную программу «Цифровая экономика» (рис. 3), которая закрепила технологии, определяющие инженерную деятельность ближайшего будущего. Само понятие тренд отражает некоторое объективное восприятие наблюдаемой тенденции. Тренды показывают нам те изменения, которые оказывают влияние на жизнь общества. Для гармоничного существования в современном мире необходимо знание о современных трендах, а также понимание стоящих за ними процессов. Ориентируясь в уровне развития формирующих тренд технологий, квалифицированному инженеру необходимо уметь оценивать уровень зрелости технологий в Российской Федерации в сравнении с мировым уровнем.

Каждая отрасль промышленности имеет свои уникальные характеристики, особенности в рамках некоторого государства и, следовательно, определяет свой индивидуальный путь развития, который зависит от научно-технического прогресса, социальной политики, культурной специфики и других факторов.

В Германии выделяются гранты на инновационные проекты, такие как Industrie 4.0, Fraunhofer Program, нацеленные на переход к киберфизическим системам.

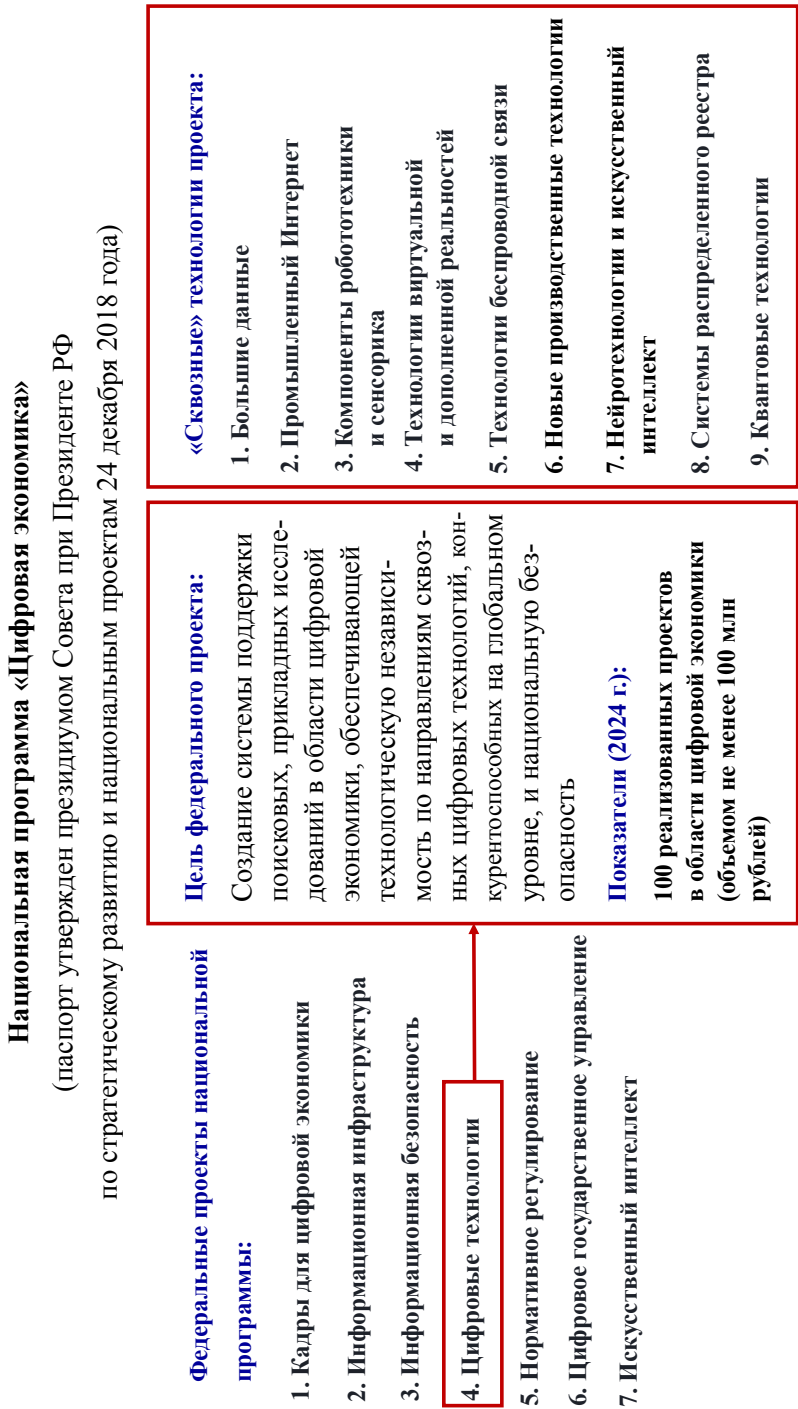


Рис. 3. Национальная программа «Цифровая экономика» [5]

В Японии наравне с поощрением исследований в области энергетики и производственных технологий решают и социальные проблемы с помощью реализации программы «Общество 5.0», происходит интеграция физического и киберфизического пространства.

Китай нацелен на развитие высокотехнологичного сектора промышленности, реализуя программу «Made in China 2025».

В качестве основных мировых трендов развития промышленности можно выделить следующие:

- рост сложности производства;
- рост сложности производимой продукции;
- цифровизация производства;
- цифровые двойники;
- переход от натурных испытаний к виртуальным;
- сокращение времени на принятие решений;
- сокращение времени на реализацию проектов;
- сокращение времени выпуска продукции на рынок;
- массовая кастомизация продукции.

Наибольшие изменения и прорывы наблюдаются в отраслях, в которых «работают» все тренды. В автомобилестроении, например, активно используют цифровые технологии, переходят в виртуальное пространство для проведения испытаний, максимально снизили срок вывода продукции на рынок с 7 до 1,5 лет. Во главу маркетинговых процессов ставится кастомизация.

Мы принимаем за нечто обыденное возможность нанести уникальное изображение на приобретаемые толстовки, футболки, кружки, сувенирную продукцию. Индивидуально сконструированным тортом ко дню рождения, свадьбе или другому торжеству с персональной поздравительной надписью уже никого не удивишь. *Кастомизация* — это индивидуализация продукции путем внесения конструктивных или дизайнерских изменений на конечных стадиях производственного цикла под заказы конкретных клиентов. Компания «Фольксваген» вместо 5—7 стандартных цветов автомобиля предлагает покупателю выбрать 20—30, а также различные варианты кожи для внутренней отделки салона. Они пошли дальше и комплектуют свою продукцию аксессуарами: солнцезащитными очками, сотовыми телефонами в единой стилистике автомобиля. Кастомизация позволяет менять массовый товар с целью удовлетворить потребности каждого покупателя и создать у потребителя ощущение, что работа делается лично для него. Есте-

ственно, кастомизация сопровождается повышением цен, но и преимущества кастомизации очевидны:

- повышение конкурентоспособности;
- увеличение рентабельности;
- прочные взаимоотношения с покупателями;
- возможность сбора информации;
- прирост новых клиентов;
- повышение продаж.

Несмотря на схожесть понятий персонализация и кастомизация, между ними есть существенная разница. *Персонализация* — это маркетинговый подход, который направлен на построение эмоциональной связи с брендом. Он основан исключительно на информации, полученной компанией от клиента после его покупки, регистрации, подписки на рассылку и так далее. Кастомизация преследует те же цели, однако клиент не получает полностью готовое предложение, он самостоятельно формирует его.

Примером еще одной компании, успешно использующей массовую кастомизацию, является Nike. Дизайн, техническое задание и система дистрибуции — три кита успеха. Для расширения влияния на рынке фирма дарит клиентам возможность подчеркнуть свою индивидуальность с помощью кастомизированной обуви. Разрабатываются программы-конструкторы. Покупатели сами собирают кроссовки: размер, материал, цвет, модель, наклейки, вышивки, можно выбрать цвет шнурков, внутреннего слоя, язычка, подошвы и т. д. Такая кастомизация помогает сделать для клиента практически эксклюзивный товар. Это — отличная возможность удовлетворить даже самые непредсказуемые желания покупателей. При этом уровень удовлетворенности клиента от такой покупки в разы выше.

Исследований, направленных на оценку влияния трендов на экономику предприятий, немного. Немецкое консалтинговое агентство Roland Berger опубликовало данные о том, что ежегодно немецкие национальные предприятия теряют до 30 млрд долларов из-за того, что не могут решить те или иные технологические задачи. По данным международной консалтинговой компании McKinsey, специализирующейся на решении задач, связанных со стратегическим управлением, до 75 % руководителей предприятий считают отсутствие технических знаний и навыков у руководящего состава сдерживающим барьером развития предприятия. Без понимания того, что происходит в техноло-

гиях и технике, а также какие на данный момент существуют тенденции в их развитии и использовании, становится практически невозможно эффективно решать возникающие задачи.

Одним из ключевых направлений развития современных производственных технологий²⁰ является цифровизация. Когда речь заходит о цифровых технологиях, нельзя не упомянуть о так называемых «взрывных» или «подрывных» технологиях. Данным термином принято называть технологии, внедрение которых способно изменить рынок.

Рассмотрим модель 6D-архитектуры развития цифровых технологий, описывающую этапы становления этих технологий.

Первый этап непосредственно связан с цифровизацией технологии. На данном этапе идет внедрение новых решений, связанных с использованием цифровых данных. Как только что-то из реального мира становится цифровым, пропадают физические ограничения и появляются возможности взаимодействия в рамках виртуальной реальности.

Второй этап связан с недооценкой новых возможностей, предоставляемых цифровыми сервисами. В свое время, лидер в фотоиндустрии, компания Kodak не оценила влияние цифровых технологий на рынок фотографий. Наблюдая медленное развитие матриц цифровых фотоаппаратов, компания сделала вывод об отсутствии потенциала у данной технологии. Компания посчитала, что качество фото пленочного аппарата намного выше изображения цифрового фотоаппарата. Данная позиция стала основой для отказа от каких-либо дальнейших разработок и исследований в области цифровой фотосъемки.

Однако следующий этап, связанный с бурным развитием цифровой техники, привел к «подрывным» изменениям во всей индустрии. Взрывной рост технологии цифровых аппаратов привел к тому, что отрасль изменилась. Компания Kodak, не заметив вовремя изменений, потеряла практически весь рынок. С другой стороны, те компании, которые сделали ставку на перспективную технологию уровня Know-Now получили преимущество. Третий этап — «Прорыв». С течением времени развитие технологии демонстрирует взрывной прирост эффективности.

²⁰ Технология — это совокупность приемов и способов обработки и переработки ресурсов в целях производства продукта с новыми характеристиками, повышающими их ценность в глазах покупателя.

Четвертый этап получил название «Демонетизация». Технология становится всеобщим достоянием. Появляются аналоги, что приводит к удешевлению. В фотоиндустрии этот период представлен появлением большого числа бюджетных цифровых фотоаппаратов.

На сегодняшний день и цифровые фотоаппараты утратили свою лидерскую позицию. Смартфоны стали универсальным решением для повседневной жизни. Появление универсального продукта является отображением пятого этапа под названием «Дематериализация», когда различные функции объединяются в рамках одного устройства.

«Демократизация» — завершающий этап, который отражает повсеместное распространение технологии.

Первые три этапа являются наиболее важными для достижения технологического лидерства в рамках определенной отрасли. Очень важно вовремя заметить изменения и отслеживать протекание данных процессов. Однако обычно этапы протекают незаметно как для общества, так и для большинства компаний, которые отдают инициативу конкурентам и теряют свои позиции на рынке.

Топ перспективных технологий, согласно опросу представителей бизнеса, содержит такие технологии, как цифровое проектирование, цифровое моделирование, аддитивные технологии, интернет вещей, большие данные, робототехника. Немаловажными факторами конкурентоспособности становятся кадры, способные внедрять и использовать перспективные технологии в реальное производство.

Полезными с точки зрения понимания перспективности технологий и уровня их готовности являются данные, предоставляемые различными аналитическими агентствами. Например, американская исследовательская и консалтинговая компания Gartner известна своим анализом развития современных технологий. Цикл зрелости прорывных технологий включает важнейшие технологии, которые, как ожидается, сильно изменят общество и бизнес в следующие 5–10 лет. В списке собраны самые значимые технологии и тренды. На основе этой методологии компания ежегодно выпускает масштабный аналитический отчет, показывающий, на каких этапах своего существования находятся развивающиеся сегодня технологические инновации и инженерные разработки. В своих отчетах данная компания применяет удобное графическое представление в виде диаграмм зрелости технологий (Gartner Hype Cycle), отображающее не только текущий уровень готовности технологии, но и всю логику развития с позиции взаимо-

действия технологии с обществом и промышленностью. Диаграмма показывает зависимость ожиданий от технологии и от ее зрелости.

В своем развитии каждая технология проходит пять этапов, поэтому диаграмма зрелости технологий (рис. 4) содержит пять ключевых участков.

- **Запуск технологии.** Технологический триггер. Зарождается новая многообещающая технология. Продукта к этому моменту обычно нет. Разработаны первые концепты, которые создадут технологии известность. Коммерческая ценность не ясна. Данная область кривой содержит технологии, которые только начинают обсуждаться в узких кругах профессионалов.
- **Пик завышенных ожиданий.** Все говорят о новом технологическом решении. Первые компании пытаются внедрить технологию в целях приобретения преимущества. Благодаря известности появляются первые истории успеха, но также и провала.
- **Пропась разочарования.** Избавление от иллюзий. Формируется понимание ограничений технологии. Выявляются слабые места и недоработки. Возникает разочарование в данной технологии, доходящее и до признания ее провальной. С ростом числа неудачных попыток интерес к ней снижается. Производители терпят провал или отказываются от разработок. Инвестиции продолжаются только в том случае, если производителям удастся удовлетворить запросы первых потребителей.
- **Склон просвещения.** Устраняются выявленные на предыдущем этапе недостатки. Это приводит к новому витку развития технологии с учетом представления о ее реальных возможностях. Технология становится более удобной в использовании. Повышается практический интерес. Происходит рост пользователей. Технология признается бизнес-сообществом. Производители выпускают второе и третье поколение продукта. Больше компаний начинают разработки.
- **Плато продуктивности.** Технология завоевала себе место на рынке. Она стала удобным инструментом в определенной области. Происходит массовое принятие технологии, ее актуальность начинает приносить прибыль.

Полный цикл проходят не все технологии. Многие сходят с дистанции.

Чем диаграмма зрелости технологий может быть полезна? Для технологического стартапа эта модель является практическим руководством. Она показывает перспективы развития бизнеса на каждом этапе развития технологий. На первом этапе еще непонятно, как она будет применяться, есть ли в ней коммерческий потенциал. Компании, которые займутся разработкой в этот момент, несут самые большие риски. Они могут все потерять, а могут стать лидерами на рынке. Здесь нужны квалифицированные инженеры и большие инвестиции.

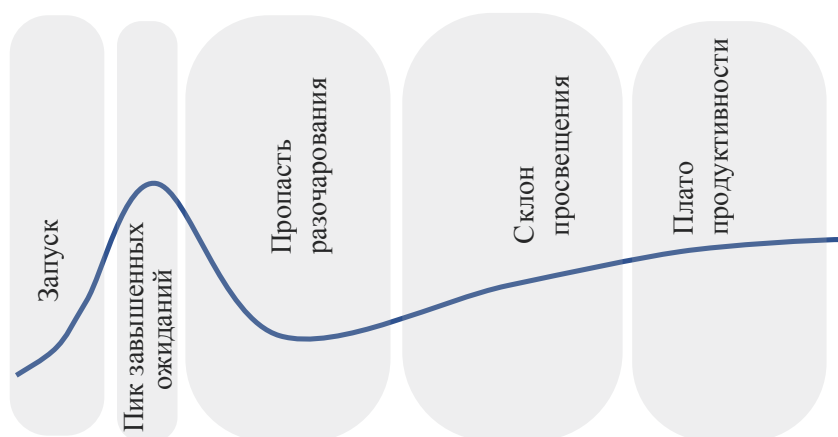


Рис. 4. Этапы диаграммы зрелости технологий [6]

На втором этапе технология становится все известнее, о ней все говорят. Есть первые истории успеха, но повторять их пока не удастся, и до создания работающего продукта еще далеко. Здесь важны скорость и напор. Спрос уже есть, но небольшой и осторожный. Его не хватит на все компании, которые занялись этой разработкой, и нужно все-речь биться за место на рынке.

После пика наступает спад и разочарование. Здесь важно запастись терпением. Развивать продукт, строить бизнес, формировать спрос от раннего большинства — не «техноголиков», гоняющихся за новинками, а тех, чьи потребности продукт начинает понемногу удовлетворять. Пригодятся стратегический подход, вера в технологию и заметные средства на продолжение разработок.

На следующем этапе становится понятно, удалось ли технологии создать новый рынок или найти новые области применения. Если да, то ситуация начинает стабилизироваться, и уместно заняться опти-

мизацией продукта и работой по его удешевлению. Все это окупится на пятом этапе, когда технология начнет входить в массовое производство, увеличивая количество покупателей.

За исследованиями компании Gartner можно следить на сайте [6]. Первая диаграмма датирована 2008 годом. На ней отмечены только облачные вычисления. Именно с них берет начало цифровая эра технологий. Диаграмма зрелости прорывных технологий 2018 года (рис. 5) уже включает более тридцати важнейших технологий. На самом пике располагается технология «Цифровой двойник» (Digital Twin). На диаграммах последних лет выделено пять зарождаемых тенденций: компонуемая архитектура (Composite architectures); алгоритмическое доверие (Algorithmic trust); не только кремний (Beyond silicon); формирующий искусственный интеллект (Formative artificial intelligence); цифровой я (Digital me). Рассмотрим их подробнее.

Тренд № 1 «Компонуемая архитектура». В условиях быстрых изменений организациям нужно переходить на более гибкую архитектуру. Компонуемая архитектура или модульные платформы представляет собой пакетные услуги, построенные на гибкой матрице данных, что позволяет удовлетворять быстро меняющиеся потребности потребителей, производителей и общества в целом. Тренд включает в себя пакетирование услуг, матрицы данных, частные 5G-сети и встроенный искусственный интеллект.

Тренд № 2 «Алгоритмическое доверие». Достаточно часто происходят утечки пользовательских данных. Интернет заполняют фейковые новости, смонтированные в личных или политических интересах недостоверные видео в огромном количестве. Предвзятый искусственный интеллект заставляет компании переходить от схемы доверия государственным органам к доверию алгоритмам. Алгоритмические модели доверия обеспечивают конфиденциальность и защиту личных данных. По мнению Gartner, повышенный интерес к блокчейну приведет к расширению возможностей цифровой аутентификации и верификации. Другие технологии тренда — ответственный и объяснимый искусственный интеллект.

Тренд № 3 «Не только кремний». По закону Мура²¹ число транзисторов в плотной интегральной схеме должно удваиваться каждые два

²¹ Закон Мура или есть ли предел мощности компьютера? — URL: <https://oyla.xyz/article/zakon-mura-ili-est-li-predel-mosnosti-komputera> (дата обращения: 30.09.2021).

Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018

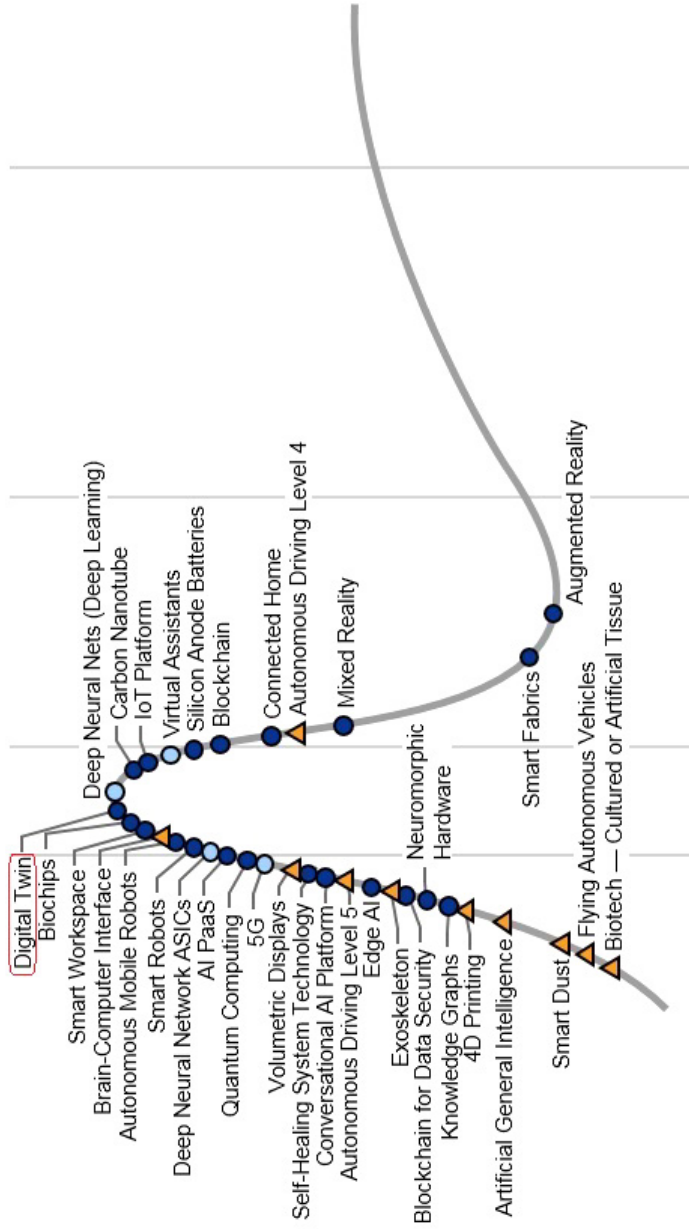


Рис. 5. Диаграмма зрелости технологий 2018 г. [6]

года, но скоро все возможности кремния уже будут исчерпаны. Это приведет к использованию других материалов с расширенными возможностями для развития компактных и быстрых технологий.

Тренд № 4 «Формирующий созидательный искусственный интеллект». Это искусственный интеллект, способный динамически меняться, чтобы реагировать на ситуацию, например адаптироваться с течением времени или создавать новые модели для решения определенных проблем.

Тренд № 5 «Цифровой я». По мере того как технологии интегрируются в жизнь людей, у них появляется больше возможностей представлять себя в цифровом виде — здесь стоит упомянуть «цифровой след», «цифровые паспорта» и «цифровых близнецов». Цифровые модели могут представлять людей как в реальном, так и в цифровом, виртуальном мире.

Именно эти пять трендов по прогнозам изменят общество и бизнес в ближайшие пять лет.

Вопросы для самоконтроля

1. В каком году был утвержден паспорт национальной программы «Цифровая экономика»?
2. Перечислите основные мировые тренды развития промышленности.
3. Раскройте понятие «кастомизация», приведите примеры.
4. Чем может быть полезна диаграмма зрелости технологий?
5. Перечислите этапы в рамках 6D-архитектуры развития технологий в хронологическом порядке.
6. Перечислите участки диаграммы зрелости развития технологий в хронологическом порядке.
7. Перечислите предпосылки возникновения алгоритмического доверия.
8. Раскройте суть тренда «Цифровой я».

Мировые технологические инициативы

Все отрасли промышленности переходят на цифровизацию, стремятся повысить качество, но при этом снизить издержки за счет большей гибкости цифрового производства. Цифровая среда призвана обеспечивать доступность информации обо всех этапах производственного цикла и заказчикам, и производителям, и поставщикам, и конечным пользователям.

Многие страны мира запускают программы, связанные с реформативанием промышленности, путем цифровой трансформации²². Необходимо реформативировать не только промышленность, но и внести существенные коррективы в технологии, культуру, экономику.

Признанным мировым лидером в области технологического развития и переоснащения промышленности является Германия. Программа Industry 4.0 — один из 10 проектов по повышению конкурентоспособности промышленности. Ключевой задачей программы является переход к киберфизическим²³ экосистемам производственного предприятия. Германия уступает развивающимся странам в затратах на рабочую силу и объеме производственных мощностей. Однако успешная реализация программы позволит обеспечить конкурентоспособность немецких производителей.

Наравне с Германией и другие страны Европейского союза включились в процесс цифровой трансформации. В рамках глобальной инициативы разработаны программы финансирования Европейского Союза Horizon 2020. Программы Factory of Future Partnership, Industrial Leadership были нацелены на модернизацию производства и повы-

²² Цифровая трансформация — это процесс интеграции инновационных (под-
рывных) технологий во все аспекты деятельности.

²³ Киберфизические системы — это набор новых технологий, позволяющих объединить реально протекающие физические процессы с их цифровыми моделями посредством применения соответствующих информационно-коммуникационных технологий.

шение конкурентоспособности европейской продукции на мировом рынке. Из прорывных технологий, выделенных ЕС, следует отметить передовые производственные технологии, самонастраивающееся «умное» оборудование, автоматизированное управление и планирование, виртуальные фабрики, кастомизацию производства.

В ответ немецкой программе Industry 4.0 в США поддержана инициатива Advanced Manufacturing Partnership, которая также подчеркивает необходимость объединения физических процессов и виртуальной среды моделирования, управления и контроля. Задача американской инициативы состоит в преодолении разрыва между фундаментальными разработками, которые финансируются государством, и созданием инновационных продуктов, финансируемых промышленными компаниями. Создано порядка 15 Институтов производственных инноваций (Institute of Manufacturing Innovation, IPI), основанных на государственночастном партнерстве. IPI концентрируются на некоторой технологии и организуют коммуникацию между учеными, инвесторами, поставщиками, производителями и потребителями данной технологии. Например, институт America Makes специализируется в области аддитивных технологий. Развитие современных прорывных технологий во многом основывается на вычислительных мощностях вычислительной техники. Инициированная в 2004 году Министерством энергетики для решения задачи создания достаточных вычислительных мощностей программа High-End Computing Revitalization Act нацелена на открытие суперкомпьютерных центров, в качестве фундамента для ускоренного развития современных цифровых технологий в США.

Азиатские страны, обладающие более высоким научнотехнологическим потенциалом, являются мировыми лидерами в области цифровых технологий. Поскольку преобразования в промышленном секторе невозможны без преобразования всех сфер жизни, в Японии привлекают цифровые технологии в контексте развития всего общества. Универсальные инструменты цифровых решений проблем, возникающих в японском обществе, учитывают сокращение численности работающего населения и его старение, экологические проблемы, нехватку природных ресурсов, противодействие стихийным бедствиям. Концепция «Общество 5.0» смены общественно-экономических форматов японского общества направлена на формирование суперинтеллектуального социума, способного применять современные информационные технологии и гармонично сосуществовать в условиях цифрового века.

Китай обладает сильной развивающейся экономикой, но зависимой от иностранных высококвалифицированных кадров и технологий. Программа развития Made in China 2025 ставит своей целью повысить долю собственной продукции на внутренних рынках Китая, а также обеспечение глобального лидерства и повышения доли китайских производителей на мировых рынках высокотехнологичных отраслях. Среди задач, ориентированных на снижение научно-технологической зависимости, можно выделить стимулирование инноваций, развитие национальных брендов, реструктуризацию и интернационализацию. В качестве ключевых отраслей промышленности выделяют медицину, энергетику, робототехнику, новые материалы, аэрокосмическую отрасль, а также развитие сельхозтехники, железнодорожной и морской техники.

В Российской Федерации существует несколько подобных программ. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года определяет цели, задачи, основные направления и приоритеты развития страны. В рамках данной программы сформулирован термин «большие вызовы» — существенные риски и проблемы, которые стоят перед обществом:

- сырьевая зависимость и цифровая революция;
- старение населения и новые болезни;
- истощение природных ресурсов и ухудшение экологии;
- продовольственная безопасность;
- выработка и сохранение энергии;
- угрозы национальной безопасности;
- освоение территории страны, мирового океана, Арктики и Антарктики.

Национальная программа «Цифровая экономика» — большой национальный проект. К 2024 году государство намерено осуществить комплексную цифровую трансформацию экономики и социальной сферы. В планах разработка законодательной базы, регламентирующей применение цифровых технологий, модернизация цифровой инфраструктуры, внедрение цифровых практик во всех ключевых сферах жизнедеятельности. Все это должно быть тесно связано с формированием цифровых компетенций у населения. В рамках федерального проекта приведен перечень сквозных технологий, развитию которых уделяется особое внимание. К сквозным цифровым технологиям относятся перспективные технологии, радикально меняющие ситуацию на существующих рынках или способствующие формированию новых

рынков. Разработаны дорожные карты развития сквозных технологий [5]: беспроводной связи, виртуальной и дополненной реальностей, систем распределенного реестра, нейротехнологий и искусственного интеллекта, новых производственных технологий и квантовых вычислений. В процессе реализации программы такие технологии, как большие данные, промышленный Интернет, робототехника и сенсорики стали субтехнологиями.

Для развития и внедрения в производственный процесс сквозных технологий были сформированы Центры компетенций Национальной технологической инициативы (НТИ²⁴). Центр компетенций НТИ представляет собой структурное подразделение, создаваемое на базе вуза или научной организации и осуществляющее комплексное развитие сквозных технологий:

- трансляция результатов фундаментальной науки в инженерные приложения (приспособление фундаментальных научных исследований и идей в прикладные технологические решения в интересах определенных промышленных партнеров);
- технологический трансфер через кооперацию с промышленными партнерами (центры НТИ содействуют формированию связей и взаимодействию между организациями, связанными с разработкой научно-технологических заделов и заинтересованными в подобных результатах промышленными представителями);
- подготовка лидеров разработки новых технологий с помощью реализации образовательных программ (центры НТИ разрабатывают соответствующие образовательные программы в целях подготовки специалистов, способных успешно раскрывать свой потенциал в условиях цифровой экономики).

Графическая интерпретация определенной логики формирования взаимодействия между всеми участниками НТИ называется Матрицей Национальной технологической инициативы (Матрица НТИ). Матрица НТИ (рис. 6) сформирована по принципу спирали: речь идет о развитии в Российской Федерации новых рынков, основанных на прорывных технологиях, к продвижению которых можно привлечь минимально достаточную плотность талантов, для эффективной работы которых создаются инструменты поддержки, работающие в сервисной модели.

²⁴ Национальная технологическая инициатива. — URL: <https://nti2035.ru/> (дата обращения: 29.09.2021).

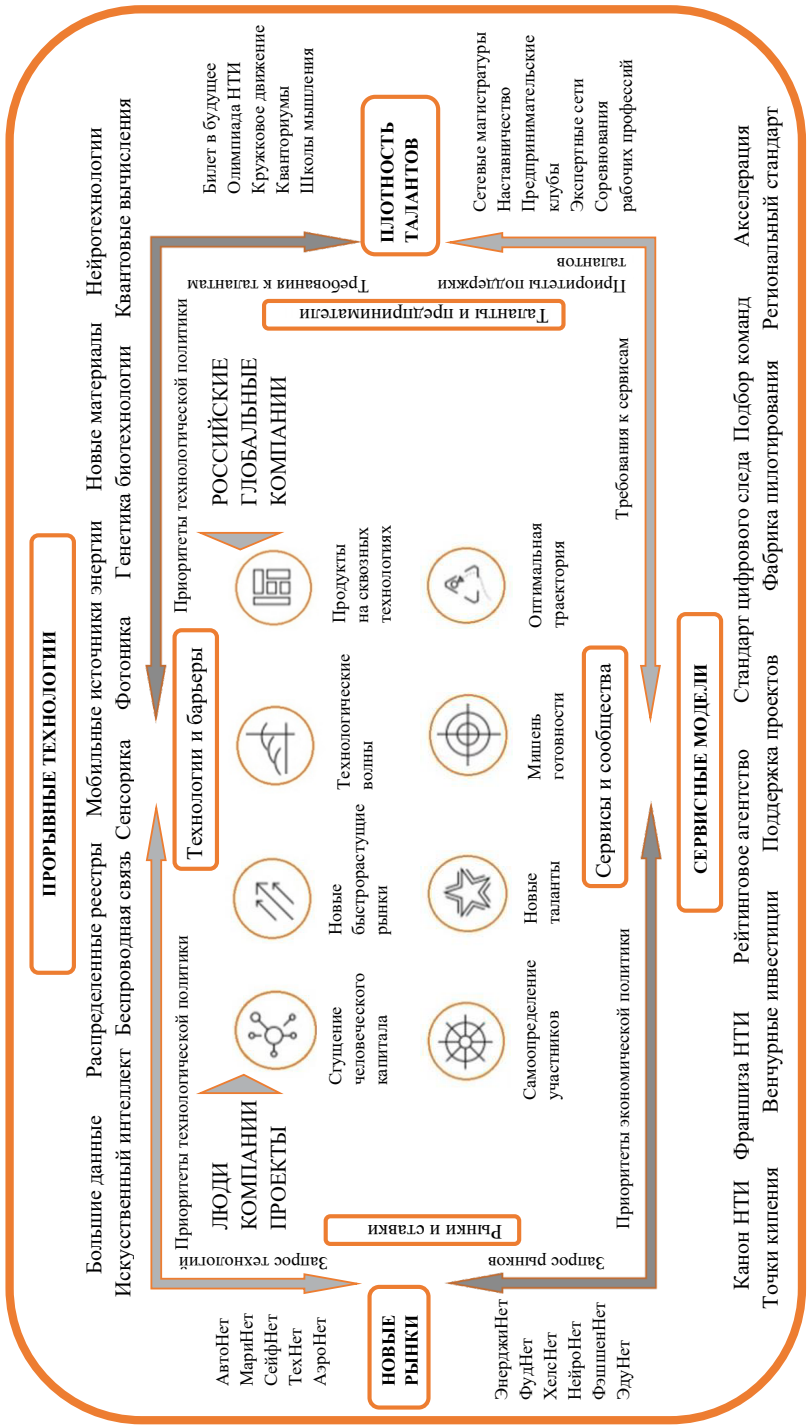


Рис. 6. Матрица Национальной технологической инициативы²⁵

²⁵ Матрица Национальной технологической инициативы. — URL: https://nti2035.ru/codes/canon?sphrase_id=35903 (дата обращения: 29.09.2021).

Национальная технологическая инициатива представляет собой долгосрочную комплексную программу по созданию условий для обеспечения глобального технологического лидерства Российской Федерации к 2035 году путем «выращивания национальных чемпионов» для высокотехнологичных рынков будущего. Анализ мирового опыта и текущих трендов развития технологических решений позволил сформировать стратегию развития на ближайшие 10–15 лет, курируемую Агентством стратегических инициатив (АСИ) и Российской венчурной компанией (РВК).

Национальная технологическая инициатива изначально строится как широкое коалиционное действие, предполагающее формирование проектных групп из технологических предпринимателей, представителей ведущих университетов и исследовательских центров, крупных деловых объединений России, институтов развития, экспертных и профессиональных сообществ, а также заинтересованных органов исполнительной власти. Функция лидера отведена отечественному высокотехнологичному бизнесу, компаниям с геном НТИ.

Выделены новые рынки, на которые сделаны ставки значимости в глобальном масштабе, они имеют сетевую природу, что отражается в присутствии «Нет» в названии. На сегодняшний день, в рамках Национальной технологической инициативы выделяют ключевые направления, которые в соответствии с прогнозами аналитиков будут наиболее актуальными в глобальном масштабе по состоянию на 2035 год:

- АвтоНет — рынок по развитию современных наземных транспортных средств, а также соответствующих услуг и систем, реализуемых на основе интеллектуальных платформ, сетей и инфраструктуры в логистике людей и вещей;
- АэроНет — рынок распределенных систем беспилотных летательных аппаратов;
- МариНет — рынок интеллектуальных систем управления морским транспортом и технологий освоения мирового океана;
- НейроНет — рынок средств человеко-машинных коммуникаций, основанных на передовых разработках в нейротехнологиях, повышающих продуктивность человеко-машинных систем, производительность психических и мыслительных процессов;
- ХелсНет — рынок персонализированных медицинских услуг и лекарственных средств, обеспечивающих рост продолжитель-

ности жизни, а также получение новых эффективных средств профилактики и лечения различных заболеваний;

- ФудНет — рынок производства и реализации питательных веществ и конечных видов пищевых продуктов;
- ЭнерджиНет — рынок распределенной энергетики, включающий как создание гибких распределительных сетей, так и современные цифровые платформы взаимодействия «поставщик-потребитель»;
- СэйфНет — рынок безопасности сетей и компьютерных технологий, нацеленный на защиту персональных и конфиденциальных данных в процессе их хранения и какого-либо использования;
- ФешшенНет — рынок мелкосерийного (штучного) выпуска персонализированной одежды и аксессуаров, с привлечением современных технологий на всех этапах производства и реализации изготавливаемой продукции;
- МедиаНет — рынок коммуникации и обмена информации между людьми, организациями и СМИ;
- ЭдуНет — рынок образования, основанный на сетевых и платформенных принципах;
- ТехНет представляет собой кросс-рыночное и кросс-отраслевое направление, обеспечивающее технологическую поддержку развития рынков НТИ и высокотехнологичных отраслей промышленности за счет развития передовых производственных технологий, включающих в себя следующие «субтехнологии»: цифровое проектирование и моделирование, новые материалы, аддитивные технологии, CNC-технологии и гибридные технологии, робототехнику, информационные системы управления предприятием, Smart Big Data и промышленный интернет вещей.

Упомянуты в концепции развития рынков Национальной технологической инициативы и профессии будущего. В рамках ЭнерджиНет прогнозируется спрос на такие специальности, как разработчик систем микрогенерации, метеоэнергетик и проектант систем рекуперации. По направлению ФудНет понадобятся специалисты по точному земледелию, ГМО-агрономы и сити-фермеры. По направлению СэйфНет прогнозируется появление профессии инженера киберфизических систем и специалиста по нейроморфным технологиям. В рамках направления ХелсНет будет спрос на архитектора медобору-

дования, биоэтика, генетического консультанта и ИТ-медика. По направлению АэроНет не обойтись без проектировщиков интерфейсов беспилотников и технологов рециклинга беспилотников. По направлению МариНет необходима подготовка портовых экологов и системных инженеров морской инфраструктуры. По направлению АвтоНет ожидается появление специальности оператора автоматизированных транспортных систем, по направлению ФинНет — менеджера краудфандинговых платформ и мультивалютного переводчика, а по направлению НейроНет — проектировщика нейроинтерфейсов и специалиста по киберпротезированию. По прогнозам аналитиков к 2023 году России потребуются до 300 тысяч специалистов по беспилотной авиации, беспилотному транспорту, умной энергетике и другим областям инженерной деятельности.

Вместе с тем ни одна из передовых производственных технологий, взятая в отдельности, не способна предоставить долгосрочного конкурентного преимущества на рынке. Такое преимущество могут обеспечить только системы комплексных технологических решений, обеспечивающие в кратчайшие сроки проектирование и производство глобально-конкурентоспособной продукции нового поколения, так называемые фабрики будущего.

Вспомним жизненный цикл производственных объектов и продуктов. Стадия конструирования и проектирования, когда на изделие готовится проект и конструкторская документация. Вся документация в современном производстве изготавливается в цифровом виде: в виде данных, распределенных в компьютерной технике, в облачных хранилищах, и т. д. Здесь уместно говорить о цифровых фабриках. Но на этом цифровизация не останавливается, потому что информационные процессы могут идти непосредственно в технологической сфере. Операции могут происходить с использованием датчиков. Причем в ходе производства изделие может определенным образом маркироваться, например уникальным номером, и к этому номеру будут «подвязываться» все свойства (в том числе возможная информация о дефектах и сбоях в ходе технологических процессов). В результате получается непрерывное сопровождение технологического процесса потоками информации, которая затем поступает в цифровую сферу. Данные, например, формируются по показателям датчиков, собирающим информацию о вибрации, шумах и температуре оборудования. Данные загружаются в облако, где подробно анализируются. Результаты на-

правляются обратно для оптимизации производительности и профилактического обслуживания оборудования.

Обрабатывать большие потоки информации призвана система комплексных технологических решений Цифровой фабрики, которая обеспечивает в кратчайшие сроки проектирование и производство глобально-конкурентоспособной продукции нового поколения от стадии исследования и планирования, когда закладываются базовые принципы изделия, и заканчивая созданием цифрового макета, цифрового двойника, опытного образца или мелкой серии. Цифровая фабрика, безбумажное производство, всё в цифре подразумевает наличие умных моделей продуктов или изделий на основе новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования.

Применяемые технологии в рамках Цифровой фабрики: цифровое проектирование и моделирование проектов, инженерных объектов, управления производством и контролирующей функции, логистики изделий и поставок комплектующих. Эволюция цифрового производства (рис. 7) показывает постепенное вовлечение различного функционала в цифровое пространство. Отслеживаются все новые материалы и конструкции, включая наличие у них сертификации; аддитивные и гибридные технологии; бионический и генеративный дизайн; компьютерное числовое управление; Smart Big Data, суперкомпьютерный инжиниринг; Smart Design, технологии оптимизации. Применяемые технологии позволяют исключить ошибки при проектировании, уменьшить объемы производственных отходов, сократить срок вывода продуктов на рынок. Продукт Цифровой фабрики — это цифровой макет, цифровой двойник и опытный образец, а возможно, и мелкая серия.

Конструкторская документация необходима для технологического и производственного процессов. Необходима постоянная обработка потоков данных как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации. Эта информация позволяет оптимизировать загрузку оборудования, минимизировать расходы, исключить неполадки и запланировать ремонты. Потоки информации по логистике, по наличию полного набора комплектующих существует и обрабатывается в цифровой среде. Такая система комплексных технологических решений Умной фабрики обеспечивает в кратчайшие сроки производство глобально-конкурентоспособной продукции нового поколения от заготовки до готового изделия.



Рис. 7. Эволюция цифрового производства²⁶

²⁶Биленко П., Лысенко С. 15 ключевых компонентов современного производства, которые работают не на всех предприятиях России. — URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18964 (дата обращения: 29.09.2021).

Отличительной чертой Умной фабрики является высокий уровень автоматизации и роботизации, исключая человеческий фактор и связанные с этим ошибки, ведущие к потере качества. Умная фабрика подразумевает наличие оборудования для производства — станков с числовым программным управлением, промышленных роботов, а также автоматизированных систем управления технологическими процессами и систем оперативного управления производственными процессами на уровне цеха.

На Умной фабрике к технологиям Цифровой фабрики добавляются: промышленные роботы, системы управления производственными процессами в виде специализированного программного обеспечения, системы управления производством, сенсорики, промышленный интернет вещей, большие данные. Умная фабрика дает превосходство в производительности, сокращает отходы производства и потребление энергии, минимизирует предпусковые операции. Продуктом является серийное изделие.

Высшей степенью развития цифрового производства является Виртуальная фабрика (рис. 8). На Виртуальной фабрике технологии Цифровой и Умной фабрик дополняются информационными системами управления предприятием, цифровизацией всего жизненного цикла инженерного объекта. Тем самым достигается повышение добавленной стоимости продуктов, прозрачности цепочек поставок, защиты интеллектуальной собственности. Продуктом Виртуальной фабрики является распределенная сеть, цепочка сертифицированных поставщиков, опытные образцы, а также и серийное изделие. Виртуальная фабрика — система комплексных технологических решений, обеспечивающая в кратчайшие сроки проектирование и производство глобально-конкурентоспособной продукции нового поколения. Виртуальная фабрика подразумевает наличие информационных систем управления предприятием, позволяющих разрабатывать и использовать в виде единого объекта модель всех организационных, технологических, логистических и прочих процессов на уровне глобальных цепочек поставок или на уровне распределенных производственных активов.

Для получения максимальной эффективности производства нужно достичь бесшовной интеграции всех сфер производственной деятельности. Бесшовная интеграция требует выхода в глобальные сети. Виртуальная фабрика расширяет горизонты возможностей кастомизации путем сборки нескольких вариантов моделей на одном конвейере. Без цифрового сопровождения и управления кастомизация очень затруднена.

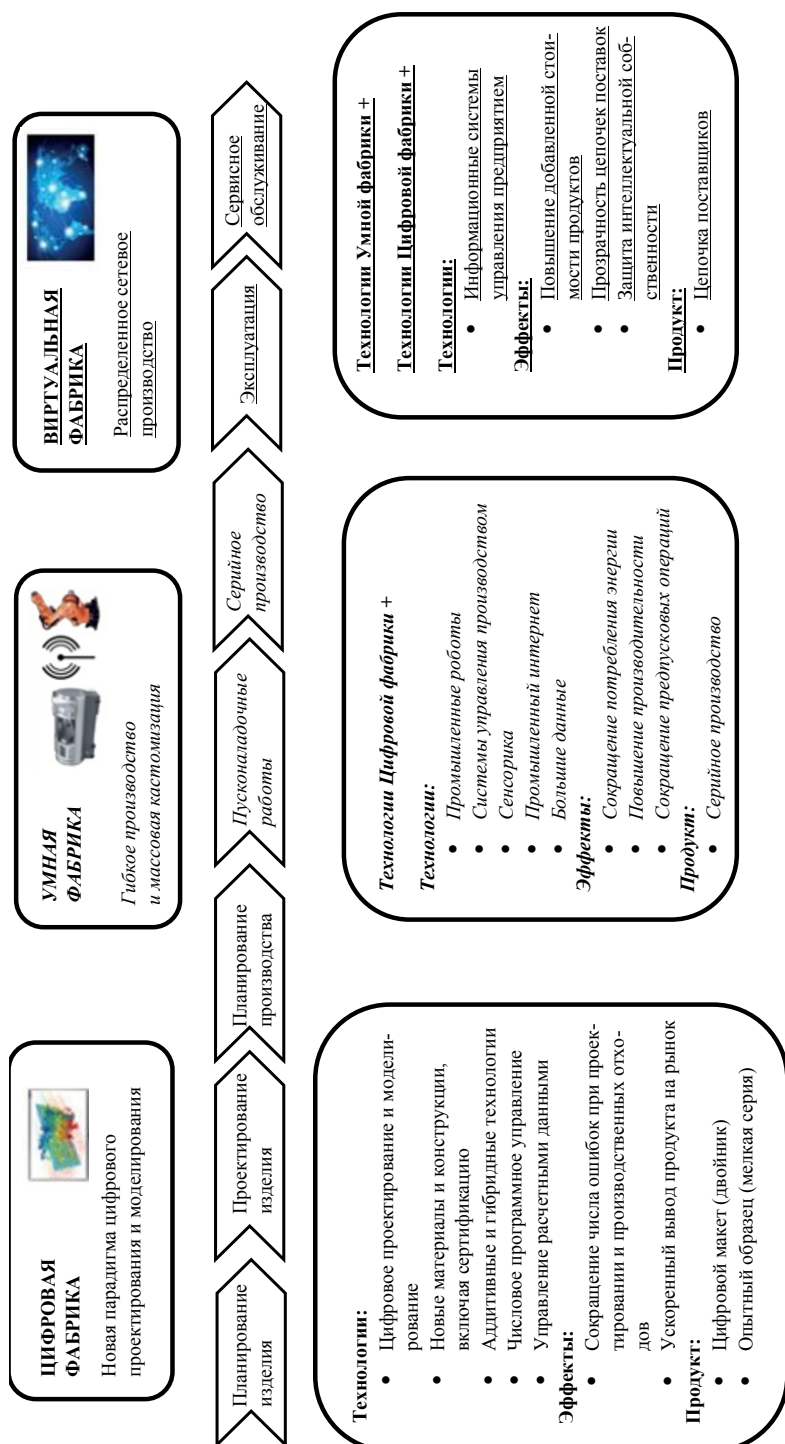


Рис. 8. Фабрики будущего²⁷

²⁷ Фабрики будущего. — URL: <https://technet-nti.ru/article/fabriki-budushhego> (дата обращения: 29.09.2021).

Наиболее востребованы на фабриках будущего уже устоявшиеся и прочно вошедшие в нашу жизнь аддитивные технологии и интернет вещей. Аддитивные технологии возникли практически синхронно с цифровизацией всей индустрии. Производится не срезание, не шлифование разными режущими инструментами, а добавление: наплавками с помощью проволоки либо еще более точных добавок пластиковых или металлических порошков, которые под энергетическим воздействием спекаются в один монолит. Поскольку следующее изделие может быть вообще не похоже на предыдущее, при использовании аддитивных технологий мгновенно происходит смена программы в отличие от станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Изготовив одно изделие без переналадки оборудования, можно производить другое изделие.

Аддитивное производство незаменимо в производстве визуальных макетов, оснастки, прототипов, серийных изделий и т. д. Среди преимуществ аддитивных технологий отметим возможность изготовления изделий сложной геометрии без существенных затрат, низкую стартовую цену, большой выбор исходных материалов, кастомизацию и высокую скорость прототипирования. Есть и недостатки, такие как низкая прочность и заметная анизотропия механических характеристик, низкая конкурентоспособность при больших партиях продукции, в некоторых случаях неизбежна дополнительная обработка. Золотое правило применения аддитивных технологий гласит, что 3D-печать — это наилучший выбор, если необходимо изготовить один или несколько экземпляров детали, нужно изготовить деталь в короткие сроки, требуется изготовить объект, производство которого с применением других технологий невозможно.

Для дальнейшей глубокой цифровизации производства необходимо оснастить производственное предприятие умным оборудованием, то есть таким, которое может коммуницировать с цифровой сферой. Существует возможность обмена данными между «вещами», оборудованием, персоналом и хранилищами проектных данных. Датчики на умном оборудовании контролируют производственный процесс и качество продукции на всех этапах жизненного цикла сложного инженерного объекта. В итоге получаем снижение издержек, повышение качества продукции и удовлетворение требований конечных потребителей.

Вопросы для самоконтроля

1. Раскройте понятие «цифровая трансформация».
2. Какая страна признана мировым лидером в области технологического развития и переоснащения промышленности?
3. В какой стране смена общественно-экономических форматов направлена на формирование суперинтеллектуального социума?
4. До какого года разработана стратегия научно-технологического развития Российской Федерации?
5. Перечислите большие вызовы, которые стоят перед российским обществом.
6. Назовите главный критерий, которому соответствуют высокотехнологичные рынки Национальной технологической инициативы.
7. Какова цель создания направления ТехНет?
8. Как называются связанные в единую сеть с распределенной системой управления и возможностью вычислений в каждом компоненте промышленные объекты?
9. Какие профессии будущего упомянуты в концепции развития рынков Национальной технологической инициативы?
10. В чем отличие Цифровой, Умной и Виртуальной фабрик?

Цифровой двойник

В традиционном подходе у производителей есть право на ошибку. Но в условиях физического пространства эти ошибки дорого стоят. Привлечение технологий виртуального моделирования, виртуальных испытаний и суперкомпьютерного проектирования обеспечивает возможность выявления и устранения всех возможных ошибок на этапе проектирования, что обеспечивает минимизацию количества итераций, связанных с перевыпуском опытных образцов продукции. Сокращаются затраты на доведение продукта до рынка. Как было показано ранее, технология цифровой двойник на диаграмме зрелости технологий 2018 года находится на самом пике (см. рис. 5) и прогнозируется ее выход на плато продуктивности в течение пяти лет.

С цифровым двойником связывают основные прорывы, включающие самые передовые технологии. Одним из авторов концепции цифрового двойника является профессор Майкл Гривс. В 2002 году на мероприятии, посвященном созданию Центра управления жизненным циклом продукта при Мичиганском университете, он предложил этот термин в контексте управления жизненным циклом. В основе концепции лежит тезис о том, что каждый инженерный объект может быть представлен в физическом пространстве и в виртуальной среде, включающей всю информацию об объекте. При этом виртуальный объект зеркально отображает реальный инженерный объект, и наоборот, между ними происходит постоянный обмен данными.

В 2010 году указание на цифровой двойник появилось в дорожной карте NASA по материалам, структурам, механическим системам и производству. В последующие годы понятие цифровой двойник фигурирует в контексте перспектив применения технологии для разработки воздушных судов и космических аппаратов нового поколения. Несмотря на активное развитие цифрового проектирования, термин цифровой двойник долгое время использовался лишь в высокотехнологичной промышленности.

Только в 2016 году технология цифровой двойник появилась на диаграмме зрелости наиболее значимых технологий, где была обозначена как технология в стадии запуска. Технология становилась более популярной, и спустя год цифровой двойник появился в цикле новых технологий с высоким потенциалом. В отчете, опубликованном компанией «Gartner» в начале 2019 года [6], сообщается, что 13 % организаций, реализующих проекты в сфере промышленного Интернета, уже используют технологии цифровых двойников, при этом еще 62 % либо находятся в процессе разработки цифровых двойников, либо планируют это сделать. Данные приводятся по результатам опроса, в котором участвовали 599 компаний из Китая, Германии, Индии, Японии, Великобритании и США. Респонденты были подобраны по двум критериям — доход компании свыше 50 млн долларов и использование промышленного интернета.

По опросу активных игроков рынка в качестве этапов жизненного цикла сложного инженерного объекта, на которых особенно существенна роль цифрового двойника, отмечены: техническое обслуживание, производство, моделирование, проектирование. Среди факторов, стимулирующих внедрение цифровых двойников на производстве, отмечаются качество продукта, снижение стоимости производства, увеличение производительности. Быстрые темпы внедрения технологии цифровых двойников объясняются как ценностью самой технологии и теми преимуществами, что она приносит, так и активными маркетинговыми и обучающими программами от вендоров²⁸. Так как достоверная модель объекта и сопутствующих физических процессов является основой для цифрового двойника, лидеры рынка цифрового проектирования и моделирования, такие как ANSYS, Dassault Systemes, PTC, ESI, Siemens Digital Industries Software, Autodesk и другие, обладающие необходимыми компетенциями, активно вовлечены в процессы создания и продвижения цифровых двойников.

Разработка и применение цифровых двойников являются передовой технологией, драйвером, интегратором сквозных цифровых технологий. Понятие цифрового двойника активно используется как промышленными компаниями, так и научными коллективами, консалтинговыми агентствами и бизнес-сообществами. Однако опре-

²⁸ Вендор — компания, выпускающая и поставляющая продукты, услуги, программное обеспечение под своей торговой маркой.

деление цифрового двойника еще не устоялось. Термин «цифровой двойник» трактуется по-разному промышленными предприятиями, поставщиками инженерного программного обеспечения, компаниями, специализирующимися на промышленном консалтинге²⁹.

Компания General Electric [7] определяет цифровой двойник как образ продукта, системы или процесса, позволяющий достигать стратегически определенные цели. Цифровой двойник может быть создан для отдельного компонента, включая статичные и подвижные элементы инженерного объекта (рис. 9); совокупности объектов. Математическая модель, база данных и аналитика составляют ключевые элементы цифрового двойника. Цифровой двойник захватывает весь жизненный цикл сложного инженерного объекта.



Рис. 9. Цифровой двойник ветрогенератора компании General Electric³⁰

Промышленный концерн Siemens, помимо цифровой модели сложного инженерного объекта, делает акцент на моделировании всего производства. Компания PTC, являясь одним из лидеров на рынке CAD-систем, подчеркивает роль цифрового двойника в прогнозировании неполадок. Консалтинговая компания Deloitte рассматривает цифровой двойник как эволюционирующий профиль, содержащий данные об объекте, способствующий оптимизации бизнеса.

Все чаще в новостных лентах встречаются примеры успешной реализации данной технологии и в Российском производстве.

²⁹ Консалтинг — управленческое консультирование по широкому кругу вопросов.

³⁰ General Electric: официальный сайт компании. — URL: <https://www.ge.com/research/offering/digital-twin-creation> (дата обращения: 04.10.2021).

Кейс 5. Для разработки технологий цифрового инжиниринга промышленных предприятий в 2019 году инновационной инфраструктурой Уральского федерального университета создан инжиниринговый центр. Применяемые в центре технологии позволяют испытывать разрабатываемые продукты до их появления в физическом пространстве за счет комплексных цифровых моделей. При таком подходе существенно сокращается время на разработку изделий и количество дорогостоящих испытаний образцов сводятся к минимуму. Центром разработан алгоритм создания цифрового двойника высокоскоростного подвижного состава с использованием технологии распределенного проектирования. Инжиниринговый центр использует прикладное программное обеспечение от ведущих мировых разработчиков, имеет высокопроизводительные вычислительные мощности с пиковой производительностью 730 Tflops³¹.

Задание. Карманный калькулятор, содержащий процессор, память и устройства ввода-вывода, в среднем имеет производительность порядка 10 флопсов. Сравните пиковую производительность вычислительных мощностей инжинирингового центра УрФУ с производительностью карманного калькулятора и суперкомпьютера «Фугаку»³².

Центр Национальной технологической инициативы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (НТИ СПбПУ) CompMechLab дает наиболее проработанное определение цифрового двойника как технологии, в основе которой лежит разработка и применение сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, объектам, машинам, конструкциям и физико-механическим, технологическим процессам, описываемых 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных [8]. Тех-

³¹ Flops — внесистемная единица, используемая для измерения производительности компьютеров, показывающая количество операций с плавающей запятой в секунду, выполняемых вычислительной системой.

³² Интересный факт. Поскольку современные компьютеры обладают высоким уровнем производительности, более распространены производные величины от флопс, образуемые путем использования приставок системы единиц СИ. Tflops — это терафлопс, равный 10^{12} флопсам. Самый производительный суперкомпьютер «Фугаку» зарегистрирован в 2020 году в Японии. Его производительность 442,01 петафлопса (или $442 \cdot 10^{15}$ флопса).

нология создания глобально конкурентоспособной продукции в кратчайшие сроки с помощью цифрового двойника объединяет следующие ключевые компоненты:

- технологии мирового уровня (*Best-in-class*) — дискретная модель цепочки технологий по созданию конкурентоспособной продукции:

$$P_{best-in-class}^{WL} = \sum_{i=1}^n \alpha_i T_i^{WL},$$

где $P_{best-in-class}^{WL}$ — глобально-конкурентоспособная продукция; α_i — весовой коэффициент, определяющий вклад технологии мирового уровня T_i^{WL} в разработку глобально конкурентоспособной продукции; T_i^{WL} — *best-in-class* технология мирового уровня. При этом обеспечивается правило нормировки:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1.$$

При компоновке цифрового двойника важно грамотно расставить веса. Если будет применена технология не мирового уровня, то общий уровень продукции упадет. Среди технологий, признанных технологиями *best-in-class*, блокчейн, промышленный Интернет, высокопроизводительные вычисления, цифровой дизайн, большие данные, виртуальная реальность, аддитивные технологии, промышленные биотехнологии, новые материалы, роботы и искусственный интеллект;

- системный инжиниринг (*systems engineering*) — междисциплинарный методический подход, регулирующий общую техническую и организационную деятельность по преобразованию набора потребностей клиентов, их ожиданий и ограничений в продукцию и поддержание этого решения в течение всего жизненного цикла, позволяющий обеспечивать и контролировать выполнение требований к продукции; необходимы подходы, позволяющие в каждый момент времени в процессе разработки контролировать весь инженерный объект и все взаимодействующие между собой подсистемы, чтобы не проходили незамеченными ситуации, когда в процессе разработки улучшение одних характеристик влечет значительное ухудшение других, не менее важных, или улучшение характеристик

на одном эксплуатационном режиме влечет ухудшение характеристик на другом. Уровень конкурентоспособности инженерного объекта определяется его наиболее «слабым» звеном;

- многоуровневая матрица M_{DT} требований, целевых показателей и ресурсных (временных, финансовых, технологических, производственных, экологических и т. д.) ограничений — это ключевой элемент технологии разработки цифрового двойника. Матрица необходима для балансировки десятков тысяч целевых характеристик как инженерного объекта в целом, так и его компонентов. Требуется достичь целевых характеристик, но при этом еще и удовлетворить множеству ресурсных ограничений. Матрица позволяет отслеживать взаимное влияние подсистем или нарушение ограничений, а также оперативно вносить необходимые изменения. По мере декомпозиции целевых показателей и ограничений происходит наполнение и последовательное формирование матрицы $\{M_{DT}: M_{DT}^{(0)}, M_{DT}^{(1)}, \dots, M_{DT}^{(Nm)}\}$ в соответствии с концепцией нисходящего проектирования. Пожелания заказчика отражаются в техническом задании. Требования к продуктам и деталям закреплены в стандартах, ГОСТах, технических условиях, документах по технике безопасности и т. д.;
- виртуальные испытания, испытательные стенды и испытательные полигоны. В процессе разработки полномасштабного цифрового двойника сложных инженерных объектов необходимо провести десятки тысяч виртуальных испытаний, вычислительных экспериментов. Количество виртуальных испытаний примерно соответствует количеству целевых показателей и ограничений, представленных в многоуровневой матрице. Для проведения виртуальных испытаний и получения достоверных результатов необходимы разработка и применение высокоадекватных виртуальных аналогов всего применяемого испытательного оборудования, испытательных стендов и полигонов, которые применяются при проведении натурных испытаний. Полученное в результате применения всех вышеперечисленных подходов, методов и технологий семейство высокоадекватных мультидисциплинарных математических моделей позволяет обеспечить отличие между результатами виртуальных испытаний и натурных испытаний в пределах $\pm 5\%$ [9].

Центр НТИ СПбПУ классифицирует цифровые двойники по глубине их проработки. Множество высокоадекватных математических моделей, виртуальных испытаний, стендов и полигонов, для разработки которых применены best-in-class технологии мирового уровня и которые позволяют осуществить глобальную и локальную балансировку конфликтующих целевых показателей и ресурсных ограничений, — это цифровой двойник объекта (Digital Twin, DT-1).

В некоторых случаях большой вклад в повышение уровня адекватности математических моделей вносит учет данных о технологиях изготовления: литье, штамповка, учет напряженно-деформированного состояния и др. Семейство высокоадекватных математических моделей технологических процессов, применяемых для изготовления продукции, а также сопутствующих виртуальных испытаний, стендов и полигонов, — это цифровой двойник технологических процессов (Digital Twin, DT-2).

Интеграция цифрового двойника объекта (DT-1) и цифрового двойника технологических процессов (DT-2) в рамках единой полномасштабной цифровой модели ведет к формированию «умного» цифрового двойника первого уровня (Smart Digital Twin, SDT⁽¹⁾). Именно такое определение позволяет говорить о новой парадигме проектирования Smart Digital Twin, которая делает процесс проектирования полностью прозрачным, принятие решений — обоснованным и задокументированным. Процесс проектирования одновременно происходит по десяткам траекторий без увеличения длительности и стоимости проекта, обеспечивая его развитие как непрерывный процесс прохождения контроля качества. Применение SDT⁽¹⁾ позволяет создать процесс цифровой сертификации. Особенно важно, что SDT дает четкое представление о расположении критических зон в конструкции, в которых имеет смысл размещать те или иные датчики, что позволяет оптимизировать объем получаемых потоковых данных, увеличить скорость обработки данных и внесения необходимых изменений в SDT⁽¹⁾ для его трансформации в умный цифровой двойник второго уровня SDT⁽²⁾. Дополнительная информация, полученная на этапе эксплуатации, а затем учтенная в цифровом двойнике, естественно, повышает уровень адекватности цифрового двойника — обучает SDT и позволяет в дальнейшем моделировать с его помощью различные возможные ситуации и эксплуатационные режимы. В дальнейшем происходит постоянное обучение цифрового двойника как в соответ-

ствии с изменениями, происходящими на протяжении жизненного цикла реального объекта, так и по результатам математического моделирования ситуаций, в которых реальный объект не эксплуатировался. Формируются SDT⁽³⁾, ..., SDT⁽ⁿ⁾.

Разрабатываются различные системы контроля и телеметрии в целях сбора достоверных сведений об объекте в процессе всего жизненного цикла, тем самым формируется цифровая тень³³. Объединение технологий цифрового двойника и цифровой тени — это то, что дает ряд конкурентных преимуществ:

- существенное сокращение времени на проектирование;
- ускоренное выведение продукта на рынок;
- минимальные сроки доведения продукта до готовности;
- снижение количества ошибок и этапов перепроектирования;
- массовая кастомизация.

Именно массовая кастомизация, а не персонализация приходит на смену массового производства. Успешная модель работы предприятия подразумевала выпуск изделия огромными партиями. В современном обществе необходима широкая линейка выбора продукции для удовлетворения потребностей всех групп потребителей, которые нуждаются в персонализированном наборе характеристик изделия. Тенденция, связанная с глобализацией и закономерным смещением идей, культур, вкусов, способствует потребности в уникальных продуктах. Промышленность стремится удовлетворить индивидуальные потребности, избегая повышения себестоимости изделий. Использование технологий цифрового двойника позволяет перейти к практически индивидуальному производственному процессу: от ручного изготовления к массовому производству, далее к массовой кастомизации и, в конце концов, киберфизическим системам для индивидуального производства (рис. 10). Еда по вкусу, одежда по персональным размерам и предпочтениям.

³³ Цифровая тень — это система связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта, как правило, в нормальных условиях работы и содержащихся в избыточных больших данных, получаемых на реальном объекте при помощи технологий промышленного интернета.

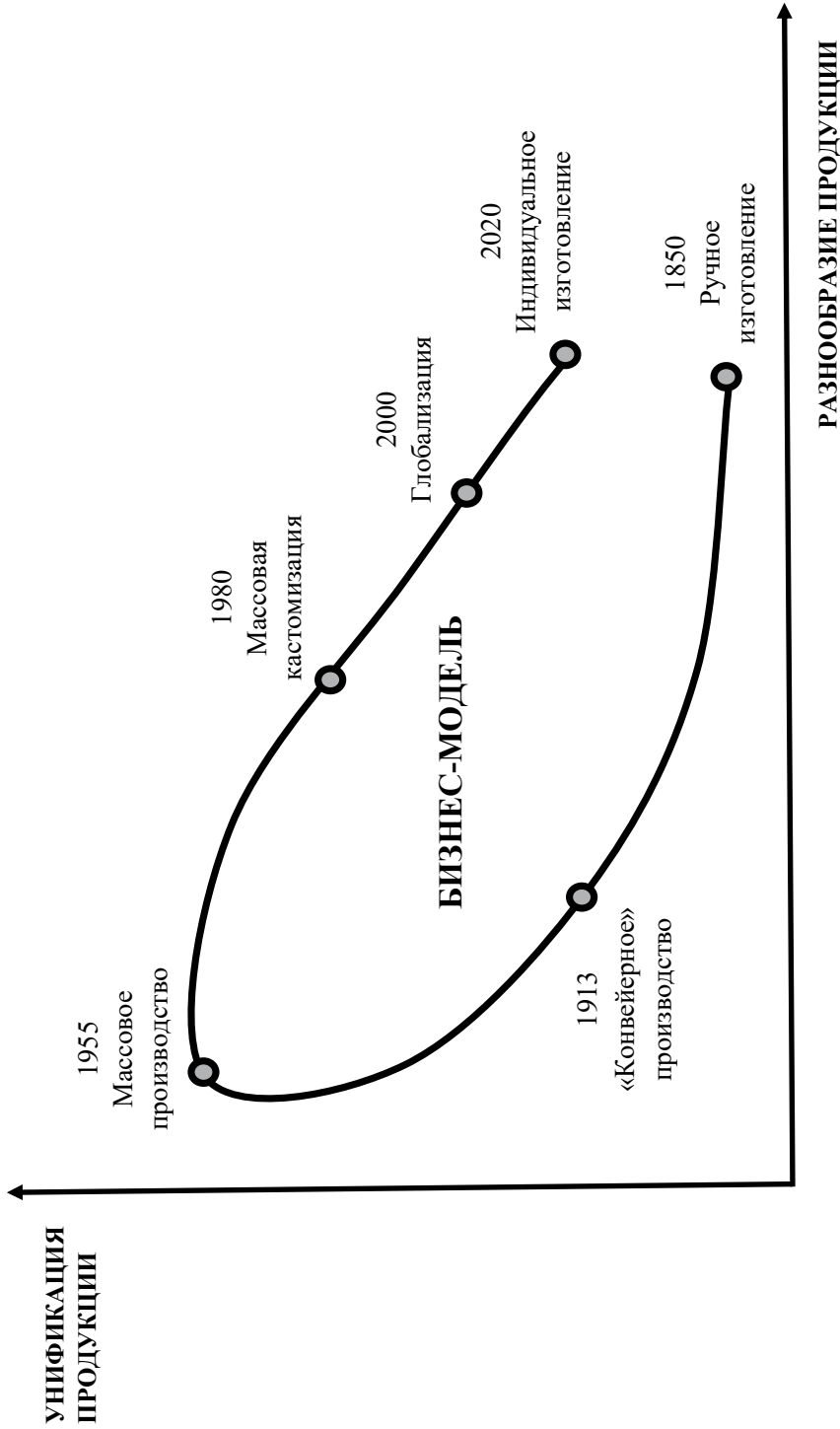


Рис. 10. Петля индивидуализации продукции с течением времени³⁴

³⁴Siemens [официальный сайт компании]. — URL: <https://www.siemens.com/global/en.html> (дата обращения: 29.09.2021).

В Инжиниринговом центре Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого за два года создан прототип Российского электромобиля «КАМА-1». Проект под названием «Создание “умного” цифрового двойника и экспериментального образца малогабаритного городского электромобиля с системой ADAS 3–4-го уровня» стал успешным воплощением технологии цифрового двойника в реальный высокотехнологичный продукт. Заказчик и промышленный партнер — «КамАЗ», представители которого сформулировали достаточно общие первоначальные требования.

По прогнозам, либо электромобили будут востребованы при условии субсидирования закупок государством для решения экологических проблем, либо это заинтересует логистические компании, городской транспорт и каршеринг. Создавая компактный, решающий экологические проблемы, но удобный автомобиль класса А для использования в черте города, в конструкцию «КАМА-1» закладывали возможность расширения модельного ряда до полноценного пятидверного автомобиля класса В. У разработчиков было три пути. Взять существующую платформу крупного автоконцерна, «апгрейдить» ее и выдать за новую российскую разработку. Второй — начать все с нуля. И третий путь — проектировать автомобиль по классической схеме с применением современного программного обеспечения без ограничений на использование существующих компонент.

Начали со стилистики автомобиля, потерпели неудачу и вынуждены были прибегнуть к помощи итальянских дизайнеров. Смоделировали платформу, используя опыт разработки президентского кортежа «Аурус», проработали каркас кузова. Провели виртуальные испытания по пассивной безопасности. Спроектировали систему кондиционирования и электрооборудование. Подготовили перечень электронных компонент электромобиля. Провели компоновку. Проработали схему шасси. Двигатель расположили сзади, рядом с ведущими колесами. За счет загрузки задних колес обеспечили разгон, высокую проходимость и маневренность электромобиля. Определили схемы посадки, вместимости, положение водителя и пассажиров. На виртуальный остов машины нанесли все компоненты. Выстроили габаритные модели в виде параллелепипедов для резервирования пространства. По мере проработки узлов и компонентов компоновка становилась более подробной. По покупным узлам использовали готовые 3D-модели от производителей. Каждый новый компонент не должен был нару-

шать заданные граничные условия и выходить за рамки многокомпонентной матрицы. Вручную учесть все критерии невозможно — разработчики создали и использовали отечественную платформу создания цифровых двойников и проведения испытаний — CML-Bench. Для проектирования использовали популярную среди автопроизводителей CAD-систему Dassault CATIA.

На подготовку технического задания, пакета технических предложений и требований потребовалось полгода. Оставшееся время ушло на создание прототипа в физическом пространстве. Изготовили все уникальные узлы, закупили мотор и батарею в Китае. Батарея в автомобиле собрана на базе ячеек Li-NMC. Учитывали целевой пробег, скорость разгона и максимальную скорость движения для тягово-динамического расчета мощности электродвигателя, передаточного числа трансмиссии, емкости аккумуляторной батареи и др. Собрали прототип и успешно провели ходовые испытания.

Разработанный цифровой двойник стал результатом балансировки более 20 тысяч характеристик матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений в части стиля, внешней аэродинамики, жесткости, прочности, пассивной безопасности, вибраций, акустики, кинематических, упругих, динамических характеристик самого автомобиля и отдельно его подвески, электрики, электроники, управляемости и устойчивости. Умный цифровой двойник электромобиля «КАМА-1» прошел более 800 виртуальных испытаний на виртуальных испытательных стендах и полигонах, продемонстрировал соответствие требованиям технического регламента таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011), гармонизированным с требованиями Правил Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций (Правила ЕЭК ООН). В компоновочной модели хранятся все варианты конструкции, комплектующие, которые можно применить для создания вариативного ряда продукции. Модель включает все результаты проверок, например исследования подвески, зон обзора, положения сидений. Созданный по компоновочной модели цифровой макет фиксирует все характеристики и компоненты.

С помощью цифрового двойника строится научно обоснованный прогноз о будущих состояниях сложного инженерного объекта и о путях достижения этого состояния. Необходимость прогнозирования вызвана тем обстоятельством, что будущие состояния объекта имеют большое значение для принятия решений в настоящий момент.

Так как имеет место неопределенность, которую полностью устранить невозможно, основной задачей в этом случае является нахождение оптимального решения из ряда альтернатив на основе объективного анализа результатов виртуальных испытаний.

Кейс 6. Сквозные технологии предполагают использование во всех областях промышленного производства роботов-манипуляторов. Роботы-манипуляторы представляют собой автоматические или управляемые оператором устройства, выполняющие заданный спектр операций вместо человека. Использование роботов-манипуляторов повышает скорость выполнения операций, уменьшает количество ошибок, причиной которых является человеческий фактор, дает возможность оптимизировать штат и площадь производства. Наибольшие осложнения возникают при постановке и решении задачи программирования движений робота-манипулятора. Исполнительным механизмом такого робота является манипулятор вместе с рабочим органом, в качестве которого может выступать механизм захвата, измерительный щуп и другие механизмы. Управление звеньями манипулятора и рабочим органом осуществляется с помощью сил и моментов, вырабатываемых системой приводов робота. Цифровые модели роботов-манипуляторов (рис. 11) позволяют прогнозировать возможные траектории движения рабочего органа в виртуальных экспериментах [10].

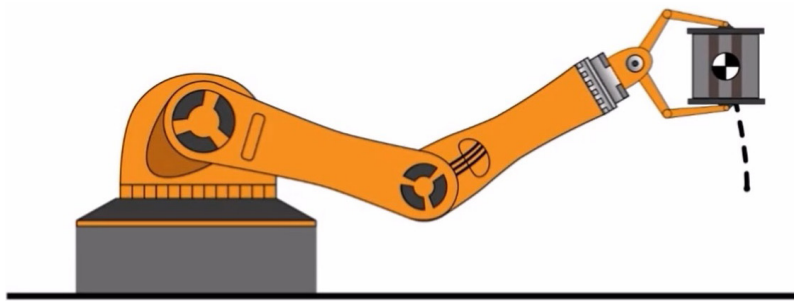


Рис. 11. Виртуальная модель робота-манипулятора

Задание. Плоский механизм робота-манипулятора (рис. 12) переносит груз из одного положения в другое по траектории, определяемой полярными координатами центра схвата $r_c = r_c(t)$, $\varphi_c = \varphi_c(t)$. Найдите законы изменения углов φ_1 и φ_2 , отрабатываемые соответствующими приводами, обеспечивающие выполнение программы перемещения

груза по прямой, отстоящей от оси y на расстоянии a , согласно закону $y = s(t)$. Запишите законы изменения углов φ_1 и φ_2 , отрабатываемые соответствующими приводами, для перемещения груза по произвольной траектории.

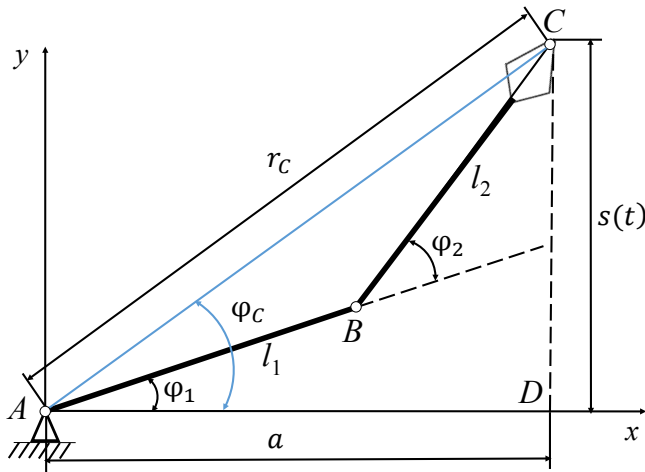


Рис. 12. Схема руки робота-манипулятора

В сентябре 2021 года приказом Росстандарта [9] утвержден новый национальный стандарт ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения»³⁵, в котором дано определение цифрового двойника как передовой технологии, созданной на пересечении материального и цифрового миров в рамках четвертой промышленной революции. Новый стандарт вводится в действие с 1 января 2022 года. ГОСТ Р 57700.37–2021, являясь первым в серии национальных и отраслевых нормативных технических документов, которые определяют порядок разработки цифровых двойников, типовые требования к структуре и порядку их сопровождения при эксплуатации изделия и т. д., распространяется на изделия машиностроения, однако, при необходимости, на его основе в дальнейшем могут разрабатываться стандарты, устанавливающие требования к цифровым двойникам изделий различных отрас-

³⁵ Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. — URL: <http://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=6&page=0&month=10&year=2021&search=цифровые%20модели&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=230908> (дата обращения: 01.11.2021).

лей промышленности с учетом их специфики. При этом необходимо отметить, что стандарт является полностью отечественной разработкой. В частности, впервые в мировой практике устанавливается единое определение цифрового двойника изделия как системы, состоящей из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием или его составными частями. Также в рамках стандарта впервые стандартизованы следующие понятия: цифровые (виртуальные) испытания; цифровой (виртуальный) испытательный стенд и цифровой (виртуальный) испытательный полигон.

Активное применение технологии цифрового двойника наблюдается во всех отраслях. Примеры успешной реализации проектов цифрового двойника есть в вертолетостроении, в беспилотных летательных аппаратах, в пищевой промышленности и в других областях. Российские компании, использующие технологии цифровых двойников, нацелены на технологический прорыв отечественного производства, но при этом испытывают дефицит в высококвалифицированных кадрах.

Вопросы для самоконтроля

1. Кто считается автором концепции цифрового двойника?
2. В каком году указание на цифровой двойник появилось в дорожной карте NASA?
3. На каких этапах жизненного цикла цифровой двойник может отслеживать информацию об изменении своих параметров?
4. Что включает в себя разработка цифрового двойника изделия?
5. Чем цифровой двойник отличается от цифровой тени?
6. Какие конкурентные преимущества дает объединение технологий цифрового двойника и цифровой тени?
7. В каком году инновационной инфраструктурой Уральского федерального университета создан инжиниринговый центр?
8. Какого сложного инженерного объекта разрабатывается цифровой двойник в инжиниринговом центре Уральского федерального университета?
9. Какого сложного инженерного объекта был создан прототип по технологии цифрового двойника за два года и представлен в декабре 2020 года инжиниринговым центром Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого?

Математическое моделирование

В основу стандартов нового поколения положены принципы математического моделирования как исследования каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения, применения и изучения их математических моделей. Математическая модель, в которой сведения об объекте представлены в виде математических символов и выражений, выступает фундаментом построения цифровых двойников, планирования и реализации виртуальных испытаний. Изначально математическая модель разрабатывается для предсказания поведения реального объекта. Она содержит ряд допущений, предположений и приближенно описывает математическими символами реальные инженерные объекты. Под математическим моделированием подразумевают не только деятельность по разработке математических моделей, но и совокупность методик разработки и исследования математических моделей.

Практически все естественные и общественные науки, использующие математический аппарат, оперируют методами математического моделирования. Математическая модель — это совокупность математических соотношений, уравнений, неравенств, описывающих основные закономерности, которым подчиняется инженерный объект. Заменяя объект исследования его математической моделью, наблюдают за поведением модели, изучают ее свойства, предсказывают реакцию модели на те или иные условия. Связь математической модели с реальностью осуществляется с помощью цепочки эмпирических законов, гипотез и упрощений. С помощью математических методов описывается, как правило, идеальный инженерный объект.

Для поддержки математического моделирования разработаны системы компьютерной математики (Maple, Mathematica, Mathcad, MATLAB и др.), которые позволяют создавать модели, менять параметры моделей в ходе моделирования и наблюдать за влиянием различных параметров на модель.

По Ляпунову математическое моделирование — это опосредованное практическое или теоретическое исследование объекта, при котором непосредственно изучается не сам интересующий нас объект, а некоторая вспомогательная искусственная или естественная система (модель), находящаяся в некотором объективном соответствии с познаваемым объектом, способная замещать его в определенных отношениях и дающая при ее исследовании, в конечном счете, информацию о самом моделируемом объекте.

В автоматизированных системах управления математическая модель используется для определения алгоритма функционирования контроллера. Этот алгоритм определяет, как следует изменять управляющее воздействие для того, чтобы была достигнута цель управления.

Несмотря на обилие определений как самой математической модели, так и моделирования, никакое определение не охватывает в полном объеме реально существующую деятельность по математическому моделированию. Но все определения полезны. В них делается попытка выделить наиболее существенные черты данной деятельности.

Первые упоминания применения математических моделей и моделирования встречаются еще в древнем мире. В III тысячелетии до нашей эры в долине рек Тигра и Ефрата шумеры использовали для астрономических расчетов двенадцати- и шестидесятиричную позиционные системы счисления. В Вавилоне знали теорему Пифагора, значение корня из двух, вычисляли квадратные и кубические корни, решали системы уравнений.

Математические знания широко использовались в древнем Египте при строительстве пирамид. Источники II тысячелетия до нашей эры содержат решение отдельных задач, встречающихся в практике, вычисления площадей и объемов.

Применение пращи и лука, баллисты требовало осознания зависимости между дальностью полета и силой броска. Мореплавание стимулировало развитие астрономии, отслеживание времени и ориентации в пространстве, строительство судов, применение гидростатики и многого другого. Торговля способствовала распространению математических знаний. Появляются научные школы как основа последующей восточно-европейской и западно-европейской науки. Именно к этому периоду относятся первые описания применения математического моделирования. Широко использовались физические модели масштабom в натуральную величину: корона Архимеда, метательные орудия. Мате-

математические расчеты применялись в случаях, когда построить натурную модель не могли. Применение математических вычислений в используемой тогда непозиционной римской системе счисления было трудной задачей. Даже много веков спустя, в средневековой Европе умножение чисел в свою программу включил только Болонский университет. Для обучения в него ехали со всей средневековой Европы. Подтверждением правильности, в том числе и инженерных расчетов, служили ссылки на библию, священные тексты и мнения высочайших особ. Например, пропорции шведского фрегата «Васа»³⁶ (рис. 13) утвердил король, в расчетной модели судна не предусматривался даже дополнительный балласт для повышения остойчивости корабля.



Рис. 13. Боевой корабль «Васа»³⁷

³⁶ Интересный факт. Боевой корабль «Васа» из-за конструктивных ошибок опрокинулся и затонул в своем первом выходе в 1628 году. «Васа» — единственный в мире сохранившийся парусный корабль начала XVII века. Длина корпуса — 69 м, ширина — 11,7 м. В 1961 году корабль был поднят, отреставрирован и в настоящее время экспонируется в специально построенном для него музее. По замыслу короля он должен был стать флагманом Шведского королевского флота. Для постройки корабля было срублено более тысячи дубов, король лично утверждал размеры и состав вооружения. Корпус корабля богато украшался позолоченными резными скульптурами. Корабль имел слишком высоко расположенный центр тяжести и был узок, его подводная часть по отношению к корпусу, рангоуту и артиллерии имела малый вес, все это привело к нарушению устойчивости корабля.

³⁷ Корабль на час. — URL: <https://infoglaz.ru/69335-korabl-na-chas.html> (дата обращения: 01.11.2021).

Развитие общества вызвало противоречие между потребностями в развитии фортификационных наук, мореплавания, астрономии, торговли и реакционным отношением церкви к развитию науки. Италия, а затем Португалия и Испания стали возрождать, перенимать античные знания арабского мира. Леонард Эйлер создал теорию проектирования корабля, решив задачу Архимеда. Это был первый весомый результат в виде формул численного интегрирования, которым мы пользуемся по сей день. Практически все применяемые математические методы были разработаны до XX века. Метод Эйлера предложен в 1730 году. В 1840 году появились методы Крамера и Гаусса. Метод Якоби датирован 1850 годом.

Отсутствие средств автоматизации сдерживало круг решаемых практических задач. Эксперименты проводились на натуральных объектах. В конце XIX века появились опытные бассейны, в которых моделировались различные сценарии действий и возможные последствия. Конструировались аэродинамические трубы для исследования моделей самолетов, обтекаемости автомобиля и даже улучшения характеристик «летающих лыжников». Необходимой частью экспериментов стала разработка критериев соответствия натуральных моделей и реальных инженерных объектов.

Кейс 7. При проектировании автотрассы учитываются многие критерии: пропускная способность, долговечность, безопасность, стоимость. Многие из них противоречивы. По статистике разделитель встречных полос на 60 % сокращает число несчастных случаев, но это дорого. Необходимы ли дополнительные траты для осуществления безопасности? С одной, этической, стороны, если благодаря разделителям будет спасена хотя бы одна жизнь — это здорово! С другой, экономической, стороны, много дорог, где нет разделителей, так зачем дополнительные расходы? На эти вопросы нет однозначных ответов. Не забывая про инженерную ответственность, желательно найти оптимальное решение задачи. Инженер должен найти приемлемое решение и опираться на строгую математическую модель. В модель закладывается ряд параметров, которые всегда можно оптимизировать по тому или иному критерию.

Из наблюдений за потоком транспорта в туннеле получили зависимость средней скорости движения потока v , км/ч, (рис. 14) от расстояния между машинами:

$d = 50$ м.....	47
$d = 41,5$ м.....	31
$d = 39,5$ м.....	31
$d = 34,5$ м.....	26
$d = 32$ м.....	24
$d = 31$ м.....	24
$d = 27$ м.....	20
$d = 26$ м.....	21
$d = 24$ м.....	19
$d = 23$ м.....	18

Благодаря интерполяции ряд экспериментально полученных данных записан в виде математического выражения, то есть построена математическая модель зависимости интервала между машинами от их средней скорости при движении по тоннелю.

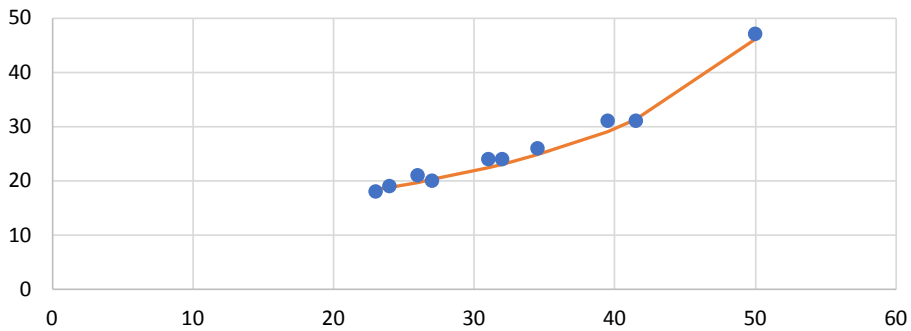


Рис. 14. График зависимости расстояния между автомобилями (горизонтальная ось) от средней скорости автомобилей (вертикальная ось)

Оранжевая линия (рис. 14) — это линия интерполяции, уравнение которой может быть записано в виде

$$d = \frac{830}{68 - v},$$

где d — среднее расстояние между машинами, м; v — средняя скорость машин, км/ч.

Это пример математической модели, которую стремится достичь инженер при нахождении оптимума. Математическое выражение описывает связь между критерием и зависимыми переменными. В этом примере единственной зависимой переменной является средняя скорость движения автомобилей по тоннелю. Знание математической за-

висимости критерия от независимых переменных — мощное оружие инженера при нахождении оптимального решения задачи.

Задание. Найти оптимальную скорость движения потока автотранспорта в тоннеле, учитывая, что число машин, проходящих через туннель за определенный интервал времени, прямо пропорционально их средней скорости и обратно пропорционально среднему расстоянию между ними.

Третья промышленная революция охарактеризовалась бурным развитием электронно-вычислительных машин. Для их применения требовалась разработка методов математического моделирования. До 1980-х годов развивались методы оценки параметров, в которых использовались упрощенные модели. Полные методы решения некоторых задач были известны еще с середины XIX века. Однако, так как требовалось много времени для решения систем дифференциальных уравнений, их практически не использовали.

В 60–80-х годах прошлого века базовым языком программирования математических задач являлся язык FORTRAN. Было создано немало математических библиотек. Распараллеливание операций, применение квантовых вычислений позволили производить сложные расчеты за минимальный промежуток времени, что приводит к увеличению производительности. Математические модели составляют базу программных продуктов для выполнения инженерных расчетов, переводя их в виртуальное пространство.

Развитие нормативной базы в области применения цифровых технологий в части моделирования физических процессов и сложных систем взаимодействующих объектов требует совершенствования понятийного аппарата, конкретизации определений и классификационных признаков, характерных для рассматриваемой области. Приказами Росстандарта [9] 13 ноября 2020 года утверждены новые национальные стандарты серии ГОСТ Р 57700 «Численное моделирование», в том числе ГОСТ Р 57700.22–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Классификация», ГОСТ Р 57700.23–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Валидация. Общие положения», ГОСТ Р 57700.24–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис», ГОСТ Р 57700.25–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации». Новые стандарты разработаны «Российским федеральным ядерным центром — Всероссийским

научно-исследовательским институтом экспериментальной физики» в рамках технического комитета по стандартизации № 700 «Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии» (ТК 700) и введены в действие с 1 июня 2021 года.

Уникальная и не имеющая аналогов в мире серия национальных стандартов ГОСТ Р 57700, первые стандарты которой появились в 2017 году, объединяет уже более 25 документов по стандартизации и формирует систему нормативных технических требований для применения компьютерных моделей и виртуальных испытаний в процессе создания и обеспечения эксплуатации высокотехнологичных промышленных изделий. Использование методов компьютерного моделирования и высокопроизводительных вычислений является ключевым фактором повышения конкурентоспособности отечественных разработок и обеспечения эффективной поддержки в создании инновационных решений в высокотехнологичных и наукоемких отраслях российской промышленности. Применение методов компьютерного моделирования и внедрение виртуальных испытаний с использованием высокопроизводительных вычислительных систем для решения практических задач предприятий промышленности позволяет сокращать сроки разработки продукции, снижать ее стоимость и повышать ее качество. Новые стандарты серии разработаны во исполнение Программы стандартизации в области разработки и применения компьютерных моделей и электронных конструкторских документов на изделия военной техники на 2020–2025 годы, принятой в 2020 году Минпромторгом России совместно с Минобороны России и Росстандартом. Документы определяют требования к классификации компьютерных моделей, а также к процедуре и порядку проведения валидации компьютерных моделей.

Вопросы для самоконтроля

1. Раскройте суть терминов: модель, математическая модель, компьютерная модель, моделирование, математическое моделирование.
2. Где зафиксированы первые упоминания о применении математических моделей и моделирования?

3. Какие позиционные системы счисления использовали шумеры для астрономических расчетов?
4. Приведите примеры систем компьютерной математики, поддерживающие математическое моделирование.
5. Приведите примеры объектов, на которых проводятся исследования в аэродинамических трубах.
6. Какие виды инженерной деятельности регламентированы в уникальной серии национальных стандартов ГОСТ Р 57700?
7. Что такое виртуальные испытания?
8. Как называется процесс определения соответствия программного обеспечения компьютерной модели реальному миру?

Реверс-инжиниринг

Довольно часто современное промышленное производство строится не на создании нового, а на воссоздании существующего сложного инженерного объекта. Используется при этом так называемый реверс-инжиниринг, когда решается обратная задача. При прямом решении задачи разрабатывается математическая модель, делаются чертежи, по ним создается готовое изделие. При решении обратной задачи по готовому изделию или его части восстанавливается проектная документация. Реверсивный инжиниринг просто необходим там, где производится ремонт уникального оборудования, создается заново утраченная технологическая документация, проводятся реставрационные работы, восстанавливается раритетная техника, осуществляется разработка антивирусного программного обеспечения и др. Это создание производственных проектов на основе реально существующих инженерных объектов в целях изучения, анализа, ремонта, модификации и даже копирования. При этом специалисты по реверсивному инжинирингу должны владеть навыками программирования, 3D-сканирования, компьютерного моделирования, анализа материалов. Они должны соблюдать правовые акты Российской Федерации и придерживаться негласного кодекса этики инженера. Компетенции реверс-инженера востребованы в современных отраслях промышленности: в авиапроизводстве, в области освоения космоса, в автопроме и судостроении, в энергетических компаниях, при строительстве и при добыче природных ресурсов. Реверс-инженеры работают не только в промышленном секторе, они также востребованы и в конструкторских бюро, научных и образовательных учреждениях, при реставрации раритетной техники, музейных экспонатов и архитектурных объектов культурного наследия, а также в области протезирования и восстановительной медицины.

Рассмотрим примеры из разных направленностей инженерной деятельности. Приведем знаковый пример реверс-инжиниринга в обла-

сти строительства. Метод реверсивного инжиниринга был использован для анализа причин обрушения подвесных галерей в отеле Hyatt Regency. Техногенная катастрофа³⁸ произошла в Канзас-Сити штата Миссури в 1981 году. В центральной части гостиницы две подвесные галереи обрушились на людей, пришедших на танцевальную вечеринку. В результате катастрофы погибли 114 человек, 216 человек получили ранения разной степени тяжести. При экспертизе по фотографиям аварии был восстановлен проект здания. Подвесные галереи из стали, стекла и бетона длиной 37 м и весом 29 тонн были главной отличительной особенностью отеля. Галереи между вторым и четвертым этажом были непосредственно друг над другом и, согласно проекту, должны были висеть на общих стержнях. При воссоздании проекта здания выяснилось, что в первоначальный проект на стадии возведения конструкций были внесены изменения (рис. 15). Вместо того чтобы подвесить галереи друг над другом на общих 32-миллиметровых в диаметре стальных стержнях, прикрепляемых к потолку, одна из галерей крепилась непосредственно к другой, которая уже была прикреплена к потолку. По проведенным расчетам силы креплений едва хватало, чтобы выдерживать вес \vec{P} всей конструкции, не говоря уже о весе находящихся на ней людей.

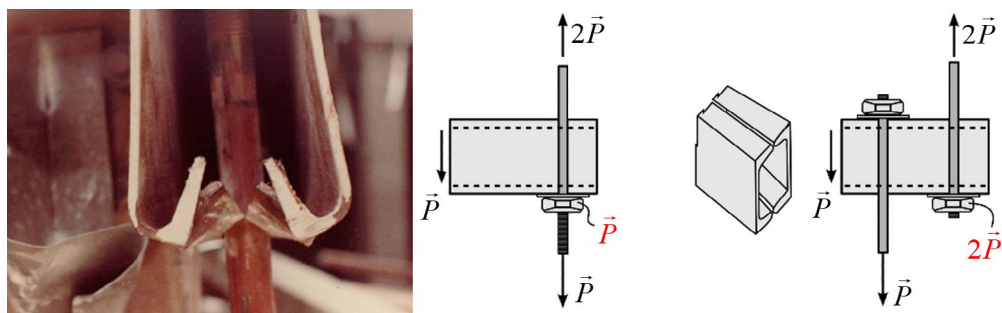


Рис. 15. Фотография с места обрушения и схема изменения конструкции³⁹

³⁸ Интересный факт. Смертоносное в истории США разрушение рукотворного объекта. Больше людей погибло только во время обрушения башенблизнецов при террористической атаке в НьюЙорке 11 сентября 2001 года.

³⁹ Обрушение подвесных галерей в отеле Hyatt Regency. — URL: https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Обрушение_подвесных_галерей_в_отеле_Hyatt_Regency&oldformat=true (дата обращения: 01.11.2021).

В результате расследования катастрофы было принято решение отказаться от уникальных сооружений. Две галереи разобрали, оставшуюся снизу подперли балками-колоннами. Эстетика и удобство отошли на второй план. Во главу угла была поставлена безопасность людей.

Говоря об ответственности инженеров, хочется подчеркнуть, что инженеры, одоббившие окончательный проект галерей, были осуждены Советом архитекторов, профессиональных инженеров и землеустроителей штата Миссури за халатность, неправомерное и непрофессиональное отношение к проектированию. Все инженеры проекта были лишены своих лицензий и исключены из Американского общества гражданских инженеров — освобожденной от налогов профессиональной организации, основанной в 1852 году.

Еще одним примером реверс-инжиниринга служит проект «Геном человека». Эта та область, где решения прямой задачи не существует. Ученые пытаются расшифровать ДНК человека, чтобы воссоздать проект нашего вида. Проект «Геном человека» (рис. 16) — это крупнейший международный междисциплинарный научно-исследовательский проект, главной целью которого является расшифровка ДНК человека и идентификация 25 тысяч генов в человеческом геноме. Проект начался в 1990 году под эгидой национальной организации здравоохранения США. В 2000 году был выпущен рабочий черновик структуры генома. Геном любого отдельно взятого организма уникален, поэтому определение последовательности человеческого генома должно включать в себя и многочисленные вариации каждого гена.

В области электроники обратная разработка электронных устройств появилась еще в 1920–1930 годах. Фирмы копировали друг у друга радиолампы и схемы. Именно с обратной разработкой связано то, что радиолампы оказались унифицированными и взаимозаменяемыми. Европейская лампа EL95 — клон американской 6KA5. Американские 6CA5 и KT88 — клоны европейской лампы EL34. Советские радиолампы 6Ж4, 6П9 — клоны американских ламп и трофейных немецких 6 Г2, ГУ50. Вместе с лампами копировались и другие детали без фактической разработки, типовые схемы, блоки радиоаппаратуры. Благодаря реверс-инжинирингу ламповая эпоха охарактеризовалась переходом к типовому проектированию в электронике. Черно-белые телевизоры выходили с конвейера и собирались по одной-двум схемам. Многие элементы различных компаний и национальных стандартов, взаимозаменяемы, например американская серия интегральных схем 7400 и ее

советский аналог К(Р)155. Процессор Am386 компании AMD создан ради совместимости с чипом 80386 фирмы Intel и в пользу экономической целесообразности.



Рис. 16. Эмблема проекта «Геном человека» и схема процесса раскручивания двойной спирали ДНК человека⁴⁰

Как осуществляется реверс-разработка электроники, посмотрим на наглядном примере [11]. Компания-производитель перестала существовать, но спрос на замену сломанных или отработавших свой ресурс кнопок вызова лифта не уменьшается. Необходимо скопировать довольно простое устройство. Для этого желательно иметь в наличии два экземпляра, один из которых можно полностью разобрать. По плану работ изучили схемы подключения платы и элементную базу. Выяснилось, что оригинальное устройство, разработанное в Китае, имеет крайне запутанную схему со множеством лишних элементов. Потом скопировали электрическую схему, считали файл прошивки из микроконтроллера. Далее произведено дизассемблирование прошивки, извлечение алгоритма работы. После подготовительных работ разработали новую плату и залили новую прошивку (рис. 17). Итоговый объем кода содержит около 600 строк на языке Си. Готовое устройство, произведенное методами реверс-инжиниринга, до сей поры производится и продается.

⁴⁰ Проект «Геном_человека». — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Проект_«Геном_человека»?source=post_page ————— (дата обращения: 01.11.2021).

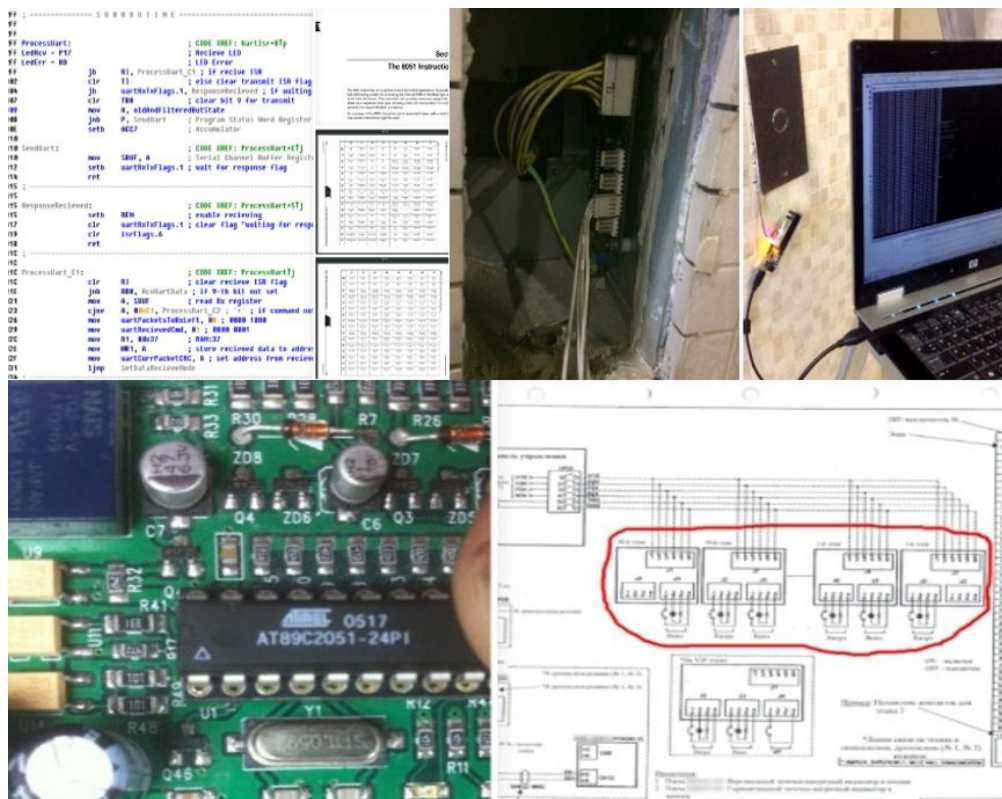


Рис. 17. Реверс-инжиниринг кнопки вызова лифта [11]

В 1945–1947 годах в целях обеспечения военно-стратегического паритета методом обратной разработки был создан и запущен в серийное производство дальний бомбардировщик Ту-4 — нелегальный аналог В-29, называемый «Летающая крепость» (рис. 18).

Несколько американских бомбардировщиков при осуществлении вылетов в Японию совершили вынужденную посадку в СССР. Конструкторское бюро Туполева получило задание остановить все собственные разработки дальних бомбардировщиков и в максимально короткие сроки скопировать В-29 насколько можно точно⁴¹. Ориги-

⁴¹ Интересный факт. Скопировали даже подстаканник в панели управления и пепельницу, несмотря на запрет курения для отечественных пилотов. На левом крыле было обнаружено небольшое отверстие. Никто не смог сказать, для чего оно. Вероятно, его сделали случайно или просто забыли заделать. Однако на всех советских Ту-4 на левом крыле появилась крошечная дырочка, сделанная самым тонким сверлом.

нальными были только двигатели, вооружение и радиоэлектронное оборудование. Трофейными были 4 самолета, в одном из которых была обнаружена техническая документация. Один образец полностью разобрали, второй оставили как эталон, на третьем выполнялись испытательные полеты, а четвертый оставался в строю.

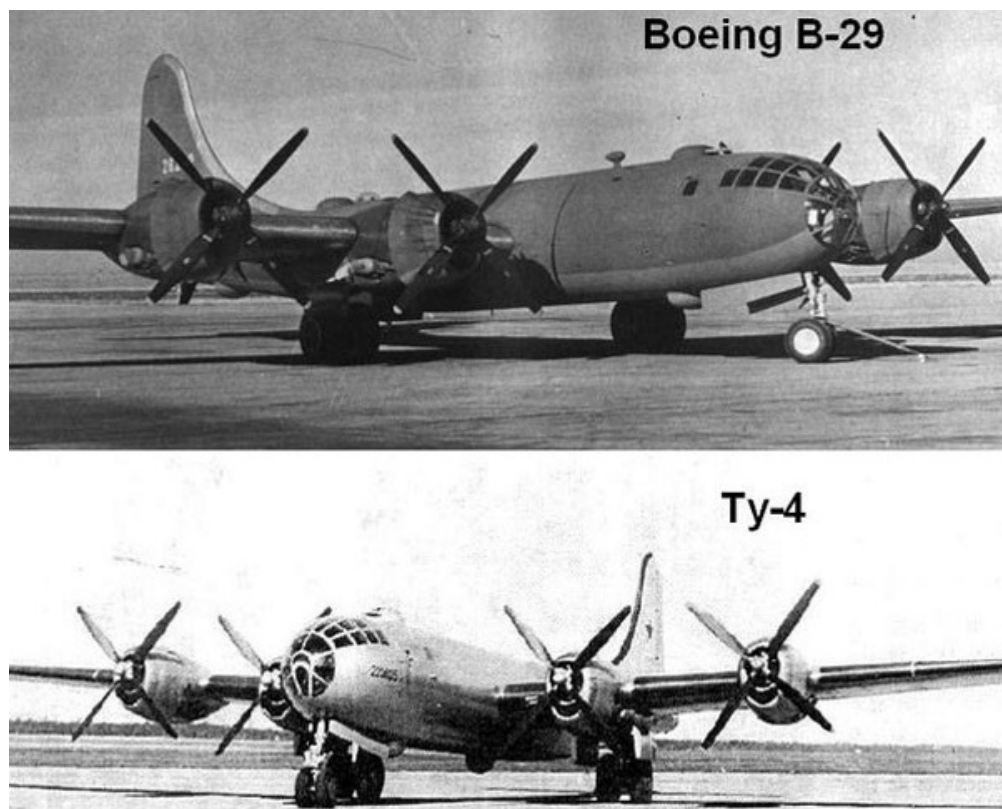


Рис. 18. Оригинал и копия летающей крепости⁴²

В качестве базовой единицы измерения при проектировании использовались дюймы⁴³. Дюралевый лист обшивки В-29 толщиной в 1/16 дюйма в СССР не производился, поэтому вместо него были использованы близкие по толщине производимые листы. Чтобы гарантировать проводимость кабельной сети дюймового сечения, при-

⁴² Советские самолеты, которые скопировали с западных аналогов. — URL: <https://russian7.ru/post/sovetskie-samolety-kotorye-skopirov/> (дата обращения: 29.09.2021).

⁴³ Дюйм — английская мера длины равная 2,54 см.

менялись более толстые кабели из проволоки метрических размеров. Это привело к увеличению веса самолета и ухудшению летных характеристик.

Современное автомобилестроение строится на реверс-инжиниринге. Как только автомобиль появляется на рынке — покупают пару образцов, разбирают на части, изучают и делают свой проект по созданию своего аналога.

В сфере программного обеспечения обратная разработка программ осуществляется в целях модификации, анализа алгоритма, написания генераторов ключей, разработки антивирусного контента, создания реляционных баз данных, получения сведений о внутреннем устройстве программ и др. Известный пример обратной разработки — исследование BIOS персонального компьютера IBM для производства IBM-совместимых компьютеров сторонними производителями. Перечислим основные методики обратной разработки программного обеспечения: анализ обмена данными; дизассемблирование машинного кода программы для получения ее листинга на языке ассемблера; декомпиляция машинного или байт-кода программы для создания исходного кода на некотором языке программирования высокого уровня.

Программисты прибегают к методу обратной разработки и в области компьютерных игр⁴⁴. Активно используются методы реверс-инжиниринга и в индустрии игр. Игра «Электроника ИМ-02», «Ну, погоди!» является нелегальной копией японской игры «Nintendo Eg-26» (рис. 19). Волка с соломенной шляпой заменил на экране волк с корзиной из мультфильма «Ну, погоди!», а петуха, выглядывающего из домика, заменили зайцем⁴⁵.

⁴⁴ Интересный факт. Федеральный апелляционный суд США постановил, что программисты не имеют права вносить изменения в код компьютерных игр компании Blizzard Entertainment. Основой данного решения стал закон DMCA — «Акт об авторском праве цифрового тысячелетия». После введения запрета пользователи легально не могут изменять игры Blizzard так, чтобы соединяться со сторонними игровыми серверами, кроме официального сервера Battle.net. Одним из преимуществ использования «нелегальных» серверов была высокая скорость соединения. Кроме DMCA, суд сослался на лицензионное соглашение покупателя игры, в котором сказано, что разбираться в ее коде (то есть непосредственно осуществлять реверсивный инжиниринг) запрещено.

⁴⁵ Интересный факт. Среди детей 1980-х годов бытовали разные мифы. Если достигаешь 1000 очков, то заяц выбегает на экран и дарит волку букет цветов, волк танцует или играет призовая мелодия. Но подобная мультипликация принципиально



Рис. 19. Электронные игры «Электроника ИМ-02» и «Nintendo Eg-26»⁴⁶

В серии игр «Электроника» изготавливали порядка 50 моделей (рис. 20), но найти их в продаже было чрезвычайно сложно.



Рис. 20. Модели игровых консолей «Электроника», выпускаемых в СССР⁴⁷

В современном производстве нередко возникают ситуации, при которых обратный инжиниринг является единственным способом решения различных задач. С помощью реверс-инжиниринга получают

невозможна при использовании дисплея подобного типа. На самом деле игра просто начинается заново.

⁴⁶ Главная электронная игра СССР. — URL: <https://blogger.belhak.ru/> (дата обращения: 01.10.2021).

⁴⁷ Советская торговля. — URL: <https://retailer.ru/sovetskaja-torgovlja-strana-strashnyh-igrushek/> (дата обращения: 01.10.2021).

цифровые копии, цифровые двойники реальных инженерных объектов, а также проводят их исследования и модернизацию. Когда срочно нужна деталь, но производитель прекратил свою деятельность или такие детали больше не выпускаются и даже когда сроки поставок растянуты или завышена цена, а также когда утрачена документация, тогда посредством обратного инжиниринга получают цифровые модели в основном методом 3D-сканирования, при котором форма объекта преобразуется в математический образ в виде облака точек. По этим моделям с помощью аддитивных технологий изготавливают новую деталь. Реверсивный инжиниринг также требует знаний в области механики, материаловедении и промышленных технологий, технологий объемной оцифровки (оптические, лазерные, ультразвуковые, контактные и магнитно-резонансные) и компьютерного конструирования (CAD).

Кейс 8. Для проведения экспертной оценки причин разлома грузовика (рис. 21) были проведены некоторые замеры и восстановлена его проектная схема. Длина прицепа составила 16 м. Нагружен прицеп равномерно по всей его длине. Масса прицепа и груза составила 36 т. Установлено, что платформа прицепа рассчитана на максимальный изгибающий момент 270 кНм. Постановка обратной задачи предполагает создание модели реального объекта, которая приближенно, но с достаточной степенью точности описывает этот объект. Для анализа возможной поломки грузовика его прицеп можно смоделировать как простую балку с опорами на левом крае и в центре задних колес.



Рис. 21. Авария грузовика

Задание. Провести экспертную оценку причин разлома грузовика. Показать, что авария была неизбежна, для такой конструкции прицепа.

Реверс изделия — творческий процесс, предполагающий понимание технологий, принципа работы устройства, умения соединить все детали изделия так, чтобы достичь заданных характеристик работы. Инженер, занимающийся обратным инжинирингом, работает в некоторой степени как археолог. Перед ним стоит задача восстановить неизвестную технологию создания изделия, детали, для получения точно такого же результата. Для этого они изучают как изделие или деталь работают, где применяются, какие могут быть способы создания копии.

Инженеры разбирают на подсистемы, части, детали имеющийся образец. Далее анализируют эти детали и исследуют связи между ними. Они восстанавливают все стадии создания этого инженерного объекта, что дает конкурентные преимущества на рынке, возможность рассекретить новые разработки, исследовать новые материалы, восстановить алгоритмы, которые использовал разработчик при создании своего изделия. На первый взгляд, создание полного аналога или заимствование алгоритма в чистом виде противозаконно, но реверс-инжиниринг как способ получения чужих коммерческих тайн может являться абсолютно законным при условии того, что образец был получен легально, например через покупку экземпляра изделия. Задача реверс-инжиниринга — не только понять принципы работы закупленного изделия, заложенных в нем алгоритмов и «секретов», но и разработать технологию воспроизведения инженерного объекта, который не будет иметь явно заимствованных из оригинала частей.

Реверс-инжиниринг имеет древнюю историю. Хотя и в достаточно примитивном виде, но он существовал еще в древние века. Древний человек копировал оружие вражеских племен. Зачастую копирование сопровождалось его улучшением. Если бы изобретатели не пользовались методом обратной разработки, то, скорее всего, развитие технического прогресса шло бы гораздо медленнее. Изобретать с нуля способны единицы. Волна технического прогресса со времен второй промышленной революции существенно расширила область применения реверс-инжиниринга. Именно благодаря реверс-инжинирингу технический прогресс стал двигаться невероятными темпами.

Краеведение, механическая реставрация раритетной техники, музейных экспонатов и архитектурных объектов культурного наследия, экспертизы, восстановление картины аварийных ситуаций — все это виды деятельности, которые позволяют инженерам решать обратные задачи.

Инженеры, которые делали ставку на решение обратных задач, были поставлены перед необходимостью учитывать законность своих действий. И даже в годы войны, когда реверс-инжиниринг военных трофеев был поставлен на поток. Вооружение противника всесторонне изучалось и внедрялось. Для достижения преимущества реверс-инжиниринг стал практически единственным источником получения прорывной, технической информации для оборонной промышленности. При этом даже в военное время внедрение происходило не напрямую, а с добавлением своих разработок для того, чтобы не нарушать авторское право.

Авторское право — институт гражданского права, регулирующий правоотношения, связанные с созданием и использованием, изданием, исполнением, показом произведений науки, литературы или искусства, то есть объективных результатов творческой деятельности людей в этих областях. Программы для ЭВМ и базы данных также охраняются авторским правом. Они приравнены к литературным произведениям и сборникам соответственно.

Авторское право включает как неимущественные (моральные) права автора, которые неотъемлемы и действуют бессрочно, так и имущественные права на использование произведения, которые автор может передавать другим лицам. Можно авторское право зарегистрировать, оплатив госпошину и собрав необходимый комплект сопроводительных документов, и получить патент или авторское свидетельство на программу для ЭВМ. Английский термин копирайт © (англ. *copyright*, от «копировать» и «право») в английском языке обозначает имущественное авторское право, то есть право копировать, воспроизводить. В книгах, учебниках, учебных пособиях на обороте титула внизу ставят знак копирайта и правообладателя рукописи, имеющего права на копирование произведения.

Срок защиты имущественных прав в большинстве стран зависит от продолжительности жизни автора и составляет 70 лет после его смерти, после чего произведение переходит в общественное достояние. Ярким примером реализации защиты авторского права является книга Адольфа Гитлера «*Mein Kampf*». В своей работе Гитлер описывает процесс своего становления антисемитом, излагает свои политические убеждения и планы на будущее Германии. До 1945 года авторские права на книгу принадлежали издательству в Баварии. До начала 2016 года был запрет издания книги и ее свободной продажи. Срок действия авторского права на эту книгу в Германии закончился 31 декабря 2015 года.

Патентное право — институт гражданского права, регулирующий правоотношения, связанные с созданием и использованием (изготовление, применение, продажа, иное введение в гражданский оборот) объектов интеллектуальной собственности, охраняемых патентом. Наряду со средствами индивидуализации (товарными знаками, наименованиями мест происхождения товаров и др.) упомянутые результаты интеллектуальной деятельности входят в число объектов промышленной собственности.

Российское законодательство не содержит в явном виде определения патента, но на практике под *патентом* понимается документ, выдаваемый от имени государства лицу, подавшему заявку в установленном законом порядке, в подтверждение его прав на изобретение, полезную модель или промышленный образец. Патент удостоверяет приоритет, авторство изобретения, полезной модели или промышленного образца и исключительное право на изобретение, полезную модель или промышленный образец. Под правом авторства понимается право признаваться автором изобретения. Под *исключительным правом* понимается то, что использование соответствующего объекта возможно либо самим правообладателем, либо с его прямого разрешения.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности» [12] создано в результате реорганизации Палаты по патентным спорам Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам в 2008 году. Оно регистрирует: изобретения и полезные модели, промышленные образцы, товарные знаки, топологии интегральных микросхем, программы для ЭВМ, базы данных (БД) и другие объекты интеллектуальной собственности. *Программа для ЭВМ* — это представленная в объективной форме совокупность данных и команд, предназначенных для функционирования ЭВМ и других компьютерных устройств в целях получения определенного результата, включая подготовительные материалы, полученные в ходе разработки программы для ЭВМ, и порождаемые ею аудиовизуальные отображения. Авторские права на все виды программ для ЭВМ (в том числе на операционные системы и программные комплексы), которые могут быть выражены на любом языке и в любой форме, включая исходный текст и объектный код, охраняются так же, как авторские права на произведения литературы (статья 1261 ГК РФ). *База данных* — это представленная в объективной форме совокупность самостоятельных материа-

лов (статей, расчетов, нормативных актов, судебных решений и иных подобных материалов), систематизированных таким образом, чтобы эти материалы могли быть найдены и обработаны с помощью электронной вычислительной машины (ЭВМ) (статья 1260 ГК РФ). *Изобретение* — это техническое решение в любой области, относящееся к продукту (в частности, устройству, веществу, штамму микроорганизма, культуре клеток растений или животных) или способу (процессу) осуществления действий над материальным объектом с помощью материальных средств, в том числе к применению продукта или способа по определенному назначению. Изобретению предоставляется правовая охрана, если оно является новым, имеет изобретательский уровень и промышленно применимо (статья 1350 ГК РФ). *Полезная модель* — это техническое решение, относящееся к устройству. Полезной модели предоставляется правовая охрана, если она является новой и промышленно применимой (статья 1351 ГК РФ). *Промышленный образец* — это решение внешнего вида изделия промышленного или кустарно-ремесленного производства. Промышленному образцу предоставляется правовая охрана, если по своим существенным признакам он является новым и оригинальным (статья 1352 ГК РФ). *Товарный знак* — это обозначение, служащее для индивидуализации товаров юридических лиц или индивидуальных предпринимателей (статья 1477 ГК РФ). В качестве товарных знаков могут быть зарегистрированы словесные, изобразительные, объемные и другие обозначения или их комбинации (статья 1482 ГК РФ).

Рассмотрим некоторые отличия авторского и патентного права. Первый патент зарегистрирован во Флоренции в 1421 году на корабельный поворотный кран Брунелески. Патентное право возникает с даты выдачи патента и защищает сущность технических идей, предметом охраны является суть, формула изобретения. Срок охраны права на патент составляет 20 лет от даты подачи заявки. Право на патент регистрируется в госорганах, а в качестве документа выдается патент. Территория действия патента ограничивается страной выдачи патента. История законодательных актов об авторском праве началась в 1710 году со Статута королевы Анны⁴⁸. Охраняется сам факт

⁴⁸ Статут королевы Анны — закон о правах авторов и книгоиздателей, принятый в 1710 году. Статут считается первым полноценным законом об авторских правах, который положил начало ряду законодательных актов в области авторских прав.

создания произведения, форму выражения произведения, но не защищает идею, сущность этого произведения. Авторское право возникает по факту создания произведения и сохраняется 70 лет после смерти автора. В качестве документа выдается свидетельство, хотя документом является само произведение. Право не регистрируется, но действует во всех странах, подписавших Бернскую конвенцию⁴⁹.

Занимаясь реверс-инжинирингом нужно быть уверенным в том, что не нарушается закон об авторском праве или патентное законодательство. Чтобы не противоречить последнему, многие разработчики делятся на две группы: одна изучает продукт, вторая его усовершенствует, пишет свою программу полученных данных и алгоритмов. Результат обратного инжиниринга не соответствует оригиналу и, таким образом, разработчики живут и работают без противоречия закону. А что касается нарушения патентов, то здесь при проведении реверс-инжиниринга следует быть вдвойне аккуратным и, в первую очередь, провести патентное исследование, дабы исключить возможность его использования.

Не всегда можно установить источник оригинального объекта. Примером может служить десятилетний судебный процесс между ADM и Intel по поводу чипов. Одна из сторон обвиняла другую в нечестной конкуренции и доказывала, что их процессор скопировали и стали выпускать как свой продукт, а другая — что это совершенно новое изобретение. Судебное разбирательство так и не установило авторство, прекратив судебный процесс.

Существует много методов исследования инженерных объектов, но нет системы модернизации. Создавая новую программу или какое-то техническое устройство, надо понимать, что, если продукт станет коммерчески интересным, его обязательно взломают, разберут по винтикам и скопируют практически один в один, раскрыв все коммерческие тайны. Единственным способом защитить право интеллектуальной собственности будет регистрация патента. Но часто фирмы, которые обладают собственными разработками, для усиления защиты комбинируют патентование и режим коммерческой тайны.

⁴⁹ Бернская конвенция по охране литературных и художественных произведений — международное соглашение в области авторского права, принятое в 1886 году. На 2020 год участниками Бернской конвенции являются 179 государств.

В этом учебном пособии рассмотрены некоторые стороны многогранной инженерной деятельности, меняющейся вместе с обществом и технологиями. Можно сделать вывод, что инженер — это человек, который постоянно что-то ищет, исследует и чему-то учится. Будьте готовы к тому, что с каждым новым заданием придется познавать что-то новое. Поэтому эта профессия для людей, готовых оставаться вечными студентами. Как минимум, нужно иметь: математический склад ума, развитое логическое мышление, усидчивость, высокую работоспособность, желание неустанно развиваться.

Вопросы для самоконтроля

1. Когда необходимо прибегнуть к методам реверс-инжиниринга?
2. Сформулируйте несколько положений негласного кодекса этики инженера.
3. Приведите примеры некорректного использования реверс-инжиниринга в строительстве, энергетике, электронике, автостроении и других отраслях.
4. В какой области знаний не существует решения прямой задачи инжиниринга?
5. Какая инженерная деятельность невозможна без решения обратной задачи инжиниринга?
6. Перечислите отличия авторского и патентного права.
7. Что означает символ ©?
8. Всегда ли можно установить источник оригинального объекта?