

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ И ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ОПК

А. И. Боровков- канд. техн. наук, **Ю. А. Рябов**- канд. полит. наук, **К. В. Кукушкин**, **В. М. Марусева**, **В. Ю. Кулемин** - канд. техн. наук
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ)

DIGITAL DUALS AND DIGITAL TRANSFORMATION OF OPK ENTERPRISES

A.I. Borovkov- Cand. tech. Sciences, Yu. A. Ryabovkand. watered Sciences, KV Kukushkin, V. M. Maruseva, V. Yu. Kulemin - Cand. tech. of science

(St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great, Engineering Center "Center for Computer engineering" SPbPU)

Рассмотрены проблемы диверсификации оборонно-промышленного комплекса (ОПК) России в контексте глобальной цифровой трансформации. Подчеркивается, что для выполнения задачи по достижению доли гражданской продукции в общем объеме продукции ОПК не менее 50 % к 2030 г. диверсификация должна основываться на технологиях четвертой промышленной революции, среди которых ключевая роль принадлежит новой парадигме цифрового проектирования и моделирования. Даны определения таких основных понятий, как «умная» модель, «умный» цифровой двойник (Smart Digital Twin), «умная» цифровая тень (Smart Digital Shadow), «цифровая сертификация», «Фабрики Будущего». Представлен успешный опыт Инжинирингового центра СПбПУ по взаимодействию с высокотехнологичными предприятиями ОПК, в том числе по разработке «умных» цифровых двойников и организации цифрового производства.

Президент РФ В. В. Путин в послании Федеральному Собранию 1 марта 2018 г. подчеркнул, что «скорость технологических изменений нарастает стремительно, идет резко вверх. Тот, кто использует эту технологическую волну, вырвется далеко вперед. Тех, кто не сможет этого сделать, она – эта волна – просто захлестнет, утопит» [1].

В этих условиях непрерывно усложняются как конечный продукт, так и производственные процессы, а возрастающая скорость изменений приводит к быстрому устареванию любого набора инженерно-технических и технологических компетенций. В свою очередь, глобализация рынков,

постоянно усиливающаяся глобальная конкуренция, применение наукоемких инноваций, появление сверхсложных научнотехнических проблем требуют от промышленности ускорения темпов развития, предельно коротких циклов разработки, низких цен и высокого качества продукции.

Для удовлетворения этим требованиям в мире происходит глобальная цифровая трансформация экономики в цифровую экономику, а высокотехнологичной промышленности – в цифровую промышленность, формируются цифровые платформы, цифровые двойники (Digital Twin) реальных объектов / продуктов (DT1) и производственных процессов (DT2), разрабатываются экспертные системы интеллектуальных помощников как первый этап развития в сторону применения искусственного интеллекта, развивается автоматизация, роботизация и интеллектуализация промышленности, осуществляется переход к киберфизическим системам, происходит объединение материального и цифрового (виртуального) миров. Эти глобальные изменения сопровождаются созданием новых бизнес-процессов на всех уровнях.

Эти явления четвертой промышленной революции, конечно, в полной мере затрагивают Россию, ее высокотехнологичную промышленность и ОПК, формируя рамочные условия, в которых будут работать предприятия ОПК в обозримой перспективе и решать задачи, поставленные руководством страны.

Стратегической задачей ОПК, сформулированной Президентом РФ В. В. Путиным в послании Федеральному Собранию 1 декабря 2016 г., является увеличение выпуска гражданской продукции и достижение ее доли в общем объеме продукции ОПК 30 % к 2025 г. и не менее 50 % к 2030 г. [2]. Чуть ранее, в ходе рабочей поездки в Тулу 8 сентября 2016 г., В. В. Путин посетил научно-производственное объединение «СПЛАВ» и провел совещание «О мерах по использованию потенциала оборонно-промышленного комплекса для выпуска высокотехнологичной продукции гражданского назначения, востребованной на внутреннем внешнем рынках» [3].

В ходе рабочей поездки в Уфу 24 января 2018 г. В. В. Путин провел совещание по вопросу диверсификации ОПК, особо подчеркнув, что важно освоить производство именно современной и конкурентоспособной гражданской продукции. Это должно обеспечить финансовую устойчивость предприятий ОПК к 2020 г., когда основная часть гособоронзаказа будет уже выполнена [4].

Несмотря на то что задача по диверсификации ОПК ставится в России не впервые (достаточно вспомнить опыт конверсии в СССР после Великой

Отечественной войны или в конце 1980-х гг.), существует целый ряд объективных и субъективных трудностей на пути ее решения в современных условиях.

По оценке экспертов, доля гражданской продукции, выпускаемой российскими предприятиями ОПК, варьируется от 10 до 25 % от общего объема производства [5, 6]. В ходе пленарной сессии «Изменения структуры производства ОПК: государственные приоритеты перспективные рынки», состоявшейся 12 июля 2017 г. в рамках Международной промышленной выставки ИННОПРОМ, заместитель Министра промышленности и торговли РФ В. С. Осьмаков отметил, что за последние пять лет российскими предприятиями закуплено около 80 000 высокоточных станков, которые позволяют производить практически любые виды продукции. Однако «для решения задач по диверсификации предприятия ОПК, привыкшие работать с одним заказчиком в рамках гособоронзаказа, должны обладать рыночным менталитетом. Недостаточно просто закупить условный суперсовременный станок. При выпуске новой продукции необходимо ориентироваться в первую очередь на рынок и учиться работать с гражданскими заказчиками» [7, 8].

Сказанное выше в полной мере коррелирует с информацией международной консалтинговой компании McKinsey и американского Фонда информационных технологий и инноваций (ITIF), в которой отражено сравнение предприятий ОПК и компаний гражданского сектора на примере США (рис. 1).

Показатель	ОПК	Гражданский сектор
Разработка продукции	<ul style="list-style-type: none"> • Продолжительная разработка с плохо определенным и часто изменяемым объемом и содержанием работ; • Ориентация на создание уникальных технологических решений, претендующих на то, что они представляют собой качественный скачок по сравнению с другими 	<ul style="list-style-type: none"> • Быстрая, ограниченная по времени разработка; • Ориентация на создание широкой линейки технологических решений, которые создаются за счет инкрементальных инноваций; • Учет требований на протяжении всего жизненного цикла
Производство	<ul style="list-style-type: none"> • Рассчитано под большие объемы выпуска продукции; • Длительные циклы производства 	<ul style="list-style-type: none"> • Рассчитано под небольшие объемы выпуска продукции; • Быстро перенастраиваемые циклы производства
Затраты на НИОКР компаниями	\$5,1 млрд 5 ведущими компаниями ОПК США в 2012 году (Lockheed Martin, Boeing Defense, L-3 Communications, Northrop Grumman и Raytheon)	\$38 млрд 5 крупнейших технологических компаний США в 2012 году (Microsoft, Intel, Google, Cisco и IBM)
Работа с заказчиками	<ul style="list-style-type: none"> • Формализованные отношения с незначительным уровнем доверия; • Отсутствие прозрачности и невысокий уровень обмена информацией 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокий уровень доверия и совместное решение проблем с использованием компетенций всех сторон; • Совместная объективная оценка затрат и сроков работ
Работа с поставщиками	<ul style="list-style-type: none"> • Критерии выбора поставщика – его возможности; • Фиксированный состав поставщиков; 	<ul style="list-style-type: none"> • Критерии выбора поставщика – стоимость, гибкость, скорость работ; • Гибко настраиваемый состав поставщиков

Рис. 1. Сравнение предприятий ОПК и компаний гражданского сектора на примере США (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [9, 10])

В свою очередь, Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA) проанализировало ситуацию в отраслях автомобилестроения, военного и гражданского авиастроения и выявило тенденцию к увеличению сроков между началом разработки и поступлением военной авиатехники в вооруженные силы с 5 лет в 1945 г. до 27 лет в 2025 г. При этом в гражданском авиастроении сроки вывода продукции на рынок также растут, хотя и не столь радикально – с 3 лет в 1960-х гг. до 7 лет в 2025 г. В автомобилестроении же, наоборот, заметно сокращение сроков вывода продукции на рынок с 7 лет в 1965 г. до 1,5 лет в 2025 г. (рис. 2). В соответствующем докладе DARPA ситуация, сложившаяся в военном авиастроении в части всё более увеличивающихся сроков между началом разработки и принятием техники на вооружение, названа угрозой национальной безопасности.

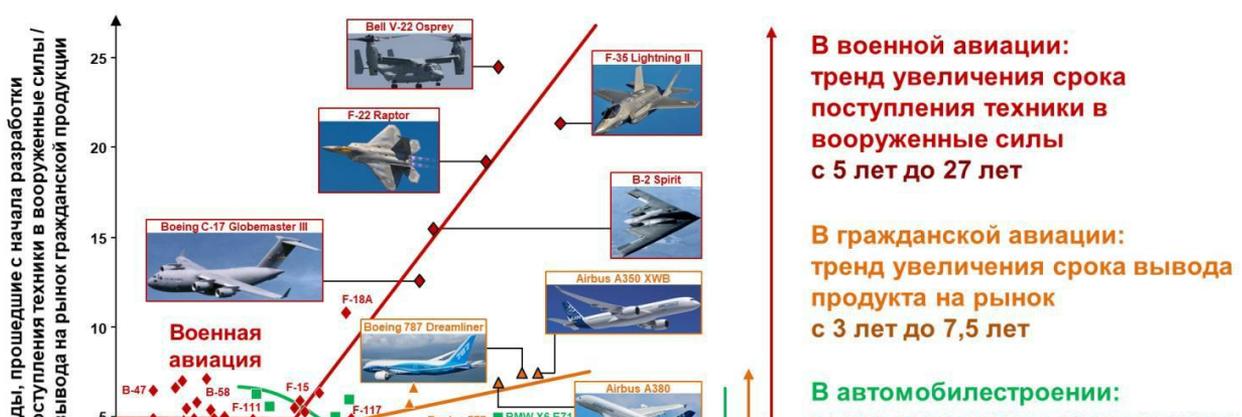


Рис. 2. Разница в скорости вывода на рынок продукции (Time-to-Market) между мировыми лидерами автомобилестроения, гражданского и военного авиастроения (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [11])

В другом исследовании DARPA отмечает, что в случае сохранения существующих тенденций по росту ВВП США, расходов на оборону и стоимости вывода на рынок одного военного самолета, гипотетически уже к 2054 г. стоимость вывода на рынок одного военного самолета достигнет величины годового бюджета на оборону, а в дальнейшем и вовсе \square ВВП США (рис. 3) [12].

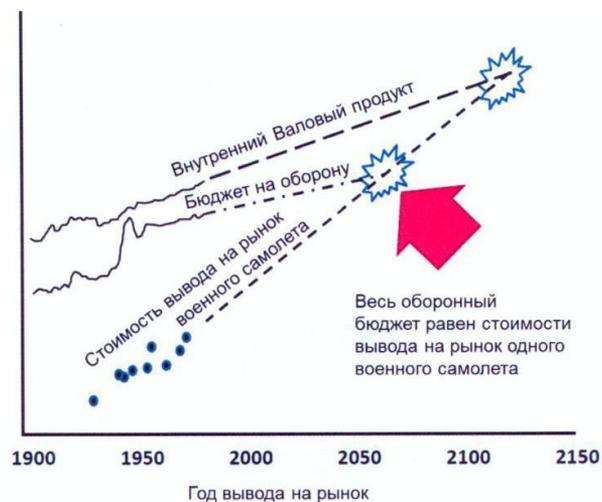


Рис. 3. Прогноз роста стоимости разработки одной модели военного самолета в США (2000–2150-е гг.) (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [12])

Таблица 1

Изменение технических требований и характеристик проектирования по некоторым видам военной продукции в разные периоды времени (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [13])

Показатель (вид продукции)	1960 -е гг.	1990 -е гг.	Следующее поколение
Мощность на 1 кг массы (военный самолет), Вт/кг	1,5	25	60
Масса (космический корабль), кг	120	3000	10 000
Мощность на 1 т водоизмещения (надводный корабль), кВт/т	1	1,5	5
Программное обеспечение (аэрокосмическая отрасль), тыс. строк кода	10	2000	10 000
Срок разработки, лет	4	12	Нет

			данных
Рост стоимости разработки	8–12 % в год		

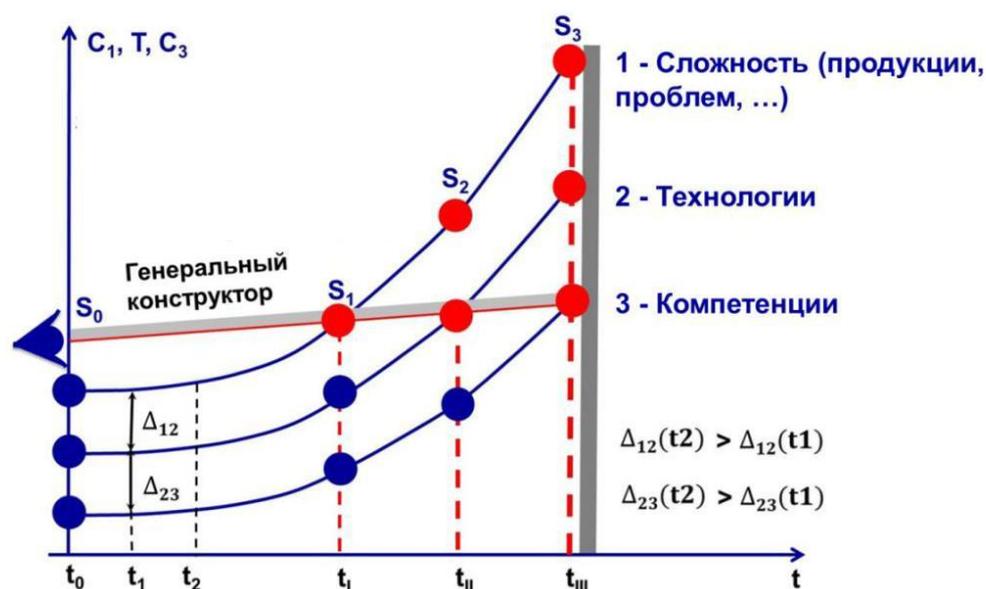
Таблица 2

Изменение технических требований и характеристик проектирования по продукции автомобилестроения в разные периоды времени (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [13])

Показатель	1960-е гг.	1990-е гг.	Следующее поколение
Количество комплектующих	10^3	10^4	10^5
Программное обеспечение, тыс. строк кода	0	1000	100 000
Срок разработки, мес.	60	36	18
Рост стоимости разработки	0 % в год		

Похожая ситуация складывается и в высокотехнологичной промышленности России (рис. 4). Наблюдается стремительный рост сложности изделий, в первую очередь тех, которые претендуют на конкурентоспособность в рамках глобальных рынков. Соответственно, возрастает и сложность технологий, с помощью которых создаются эти изделия, но с некоторым отставанием от роста сложности самих изделий, поскольку для развития технологий требуются дополнительные вложения и время. Наконец, с некоторым отставанием от сложности технологий растут компетенции – традиционный цикл подготовки инженера (четыре года бакалавриата и два года магистратуры) отстает от скорости появления, изменения и развития технологии. В определенный момент времени сложность изделий возрастает настолько, что выходит за пределы понимания генерального конструктора, его опыта и знаний, основанных на опыте и знаниях предыдущих поколений инженеров («грань интуиции генерального конструктора»). Это означает, что он начинает сталкиваться с задачами, которые не были решены ни его предшественниками, ни им

самим. Одновременно происходит экспоненциальный рост технологий, а чтобы производить глобально конкурентоспособную продукцию в условиях всегда жестко ограниченных временных и финансовых ресурсов, необходимо использовать новые технологии, которыми генеральный конструктор, компания или целая отрасль не обладают. Равно как и компетенциями мирового уровня, поскольку для удержания компетентных кадров требуется, в том числе, высокий уровень оплаты труда, который не каждое предприятие может предложить.



«Проектирование за гранью интуиции генерального конструктора»

(Боровков А. И., 2011)

Рис. 4. Эволюция триады «Сложность & Технологии & Компетенции»
(источник: Центр НТИ СПбПУ):

\square_{12} – разница между ростом сложности продукции и ростом сложности технологий; \square_{23} – разница между ростом сложности технологий и ростом компетенций; S_0, S_1, S_2, S_3 – точки во времени, в которые фиксируется рост сложности

В этих условиях, для того чтобы быть успешной, диверсификация ОПК России должна основываться на технологиях четвертой промышленной революции (условно назовем такую диверсификацию «Конверсия 4.0»). О каких именно технологиях идет речь?

В рамках форума «Открытые инновации» 17 октября 2017 г. А. И. Боровков дал интервью сотрудникам Всемирного экономического форума (ВЭФ), которые в тот момент готовили продолжение и дополнение книги основателя и президента ВЭФ К. Шваба «Четвертая промышленная

революция» с рабочим названием «Shaping the Fourth Industrial Revolution». В интервью А. И. Боровков рассказал о своих взглядах на цифровую трансформацию бизнес-моделей, бизнес-процессов и образования, о подготовке специалистов будущего, моделях развития университетов, а также передовых производственных технологиях, эффективных моделях разработки и внедрения высокотехнологичных инноваций и др.

Результатом интервью стало приглашение выступить 17 ноября 2017 г. на заседании рабочей группы в штабквартире ВЭФ в Женеве на сессии «Shaping the Future of Production in Russia» («Формирование будущего производства в России»)* с докладом на тему «Smart Digital Twins and Factories of the Future as a Tool for Leapfrogging» («Умные» цифровые двойники и Фабрики Будущего как инструмент для обеспечения глобальной конкурентоспособности»). В заседании приняли участие представители таких компаний, как «Базовый элемент», «РОТЕК», «Северсталь», «Газпром нефть», «СИБУР Холдинг», «Яндекс», «Лаборатория Касперского» и др. [16].

Приглашенным на заседание рабочей группы были заранее разосланы материалы, в которых было представлено 10 технологий, выделенных ВЭФ, которые окажут наибольшее влияние на производство в будущем. В докладе А. И. Боровков представил свое видение того, какие именно из предложенных технологий будут играть ключевую роль (в порядке убывания значимости) (рис. 5):

1. Цифровое проектирование, моделирование и интеграция.
2. Высокопроизводительные вычисления.
3. 3D-печать и аддитивное производство.
4. Передовые материалы.
5. Робототехника и искусственный интеллект.
6. Большие данные и передовая аналитика.
7. «Интернет вещей».
8. Дополненная и виртуальная реальность.
9. Технологии блокчейна.
10. Промышленные биотехнологии [17].

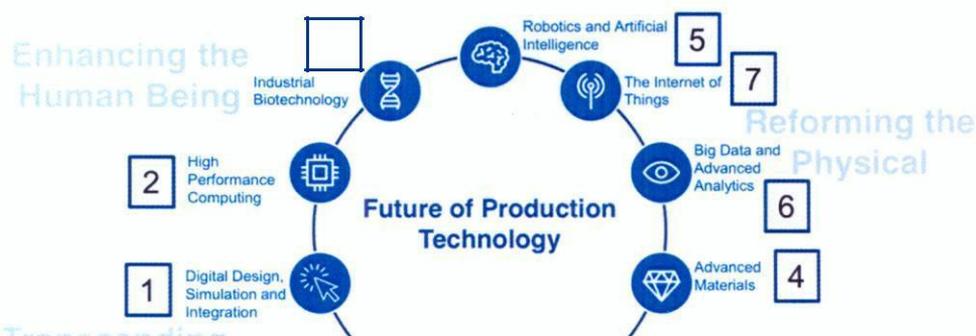


Рис. 5. Десять технологий, которые окажут наибольшее влияние на производство в будущем (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [17])

Стоит подчеркнуть, что целый ряд выделенных ВЭФ технологий совпадает со «сквозными технологиями», которые рассматриваются в рамках Национальной технологической инициативы (НТИ) как «ключевые научно-технические направления, развитие которых позволит обеспечить радикальное изменение ситуации на существующих рынках технологий, продуктов и услуг или будет способствовать формированию новых рынков» [18].

К сквозным технологиям НТИ относятся (в порядке, определенном соответствующими нормативно-правовыми актами):

- технологии хранения и анализа больших данных;
- искусственный интеллект;
- технологии распределенных реестров;
- квантовые технологии;
- технологии создания новых и портативных источников энергии;
- новые производственные технологии;
- технологии сенсорики, производства компонентов робототехники;
- технологии беспроводной связи и «интернета вещей»;
- технологии управления свойствами биологических объектов;
- нейротехнологии, технологии виртуальной и дополненной

реальности.

В ноябре-декабре 2017 г. был проведен всероссийский конкурс на предоставление грантов на государственную поддержку центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций. По 10 сквозным технологиям было подано 70 заявок, из них требованиям конкурсной документации соответствовало 60. По направлению «Новые производственные технологии» рассматривалось 10 заявок, а победителем стал Центр НТИ на базе Института передовых производственных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Центр НТИ СПбПУ) [19].

Для реализации программы Центра НТИ СПбПУ был создан мощный сбалансированный проектный консорциум, в который по состоянию на конец марта 2018 г. вошли 36 организаций, а его лидером является СПбПУ. В состав консорциума на основании подписанных соглашений входят: 12

ведущих университетов, госкорпорация «Ростех», крупные промышленные высокотехнологические предприятия – лидеры отраслей, крупнейшие научные организации, высокотехнологические компании-лидеры, участники проекта «Национальные чемпионы», победители конкурса «Развитие-НТИ» Фонда содействия инновациям, резиденты Фонда «Сколково», институты развития.

Одной из целей сотрудничества в рамках консорциума является обеспечение инновационного прорыва, создание глобально конкурентоспособной продукции нового поколения с пониманием, что просто наличие вышеуказанных технологий – лишь необходимое, но никак не достаточное условие для присутствия на глобальном рынке в условиях четвертой промышленной революции.

Инновационный прорыв может обеспечить оптимальное и эффективное комплексирование различных из числа лучших в мире («best-in-class») технологий с добавлением оригинальных кросс-отраслевых интеллектуальных ноу-хау, сформированных, как правило, в процессе работы с различными промышленными компаниями – мировыми лидерами в рамках международной системы разделения труда, участия в глобальных технологических цепочках. В итоге формируется комплексное высокотехнологичное решение, которое априори является лучшим в мире и которое, а это принципиально важно, обеспечивает в кратчайшие сроки проектирование и производство глобально конкурентоспособной продукции нового поколения.

Такие комплексные решения – Цифровые, «Умные», Виртуальные Фабрики Будущего (Digital, Smart, Virtual Factories of the Future) – имеют принципиальную схему в виде триады «цифровое проектирование и моделирование & новые материалы & аддитивные технологии», в которой драйвером выступает новая парадигма цифрового проектирования и моделирования Smart Digital Twin – [(Simulation & Optimization)-Based Smart Big Data]-Driven Advanced (Design & Manufacturing) [20].

Более 40 лет назад создание и применение в разработке технических систем и конструкций САД-систем (систем автоматизированного проектирования) было признано Национальным научным фондом США (NSF) величайшим событием, позволившим резко повысить производительность труда и сравнимым в этом смысле с началом «эпохи электричества» [21].

Сегодня в современной высокотехнологичной промышленности произошли значительные структурные изменения – смещение «центра тяжести» в глобальной конкуренции на этап проектирования. Традиционные подходы и технологии, основанные, как правило, на доводке изделий путём дорогостоящих испытаний, достигли своего «потолка» в развитии и применении и, фактически, становятся неконкурентоспособными.

Ранее процесс разработки выглядел следующим образом: на основе реального объекта строилась его физическая модель, как правило,

чрезвычайно упрощенная, которая в процессе формирования математической модели описывалась уравнениями математической физики (т. е. строилась математическая модель, включающая математическое описание моделируемой конструкции в соответствии с теоретическими положениями кинематики, динамики и прочности, особенностями поведения материалов под действием нагрузок и температур и т. д.). Далее в результате многочисленных и дорогостоящих натурных испытаний опытных образцов (прототипов) получали дополнительную информацию о поведении («отклике») опытного образца, а затем итерационным путем осуществлялась корректировка математической расчетной модели, рабочей конструкторской документации, а по итогам – и доводка конечного изделия до требуемых целевых характеристик.

При этом важно отметить, что адекватность изначально выбранной физической модели, понимаемая как «правильное качественное описание объекта по выбранным характеристикам» и «правильное количественное описание объекта по выбранным характеристикам с некоторой разумной степенью точности» [22, с. 110–111], оставалась достаточно низкой. В качестве аргумента приводилось утверждение, что при выборе более адекватной и более сложной физической модели математическая модель могла оказаться настолько сложной, что для дальнейшей работы с ней потребовалось бы ее значительное упрощение и, как следствие, снижение адекватности [22, с. 119]. В настоящее время за счет применения метода конечных элементов (Finite Element Method, FEM), компьютерных технологий мирового уровня (CAD-CAE-CFD-FSI-MBD-EMA-CAO-NPC-...) стало возможным радикально повысить уровень адекватности физических моделей, а благодаря использованию «best-in-class» компьютерных технологий мирового уровня и новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования – повысить уровень адекватности и математических моделей, а соответственно, и уровень получаемых численных результатов (рис. 6). Это позволит практически полностью отказаться от интуитивных методов работы инженеров, когда новая конструкция создается, как правило, на основе уже работающих прототипов: «от добра добра не ищут», «лучшее – враг хорошего». На этом этапе происходит делегирование ответственности за модернизируемое изделие предшествующим поколениям конструкторов, у которых зачастую было больше времени и финансовых средств на разработку уже эксплуатируемого изделия. Более того, сегодняшних конструкторов остро волнует вопрос – «А как поведет себя модернизированное изделие, а как оно себя проявит на тех или иных режимах эксплуатации?». Именно поэтому создается мало конструкций, машин, приборов нового поколения или принципиально новых, которые должны быть глобально конкурентоспособными, востребованными и кастомизированными, персонализированными или даже кастомными, т. е. с самого начала спроектированными под постоянно повышающиеся требования потребителя и глобального рынка.

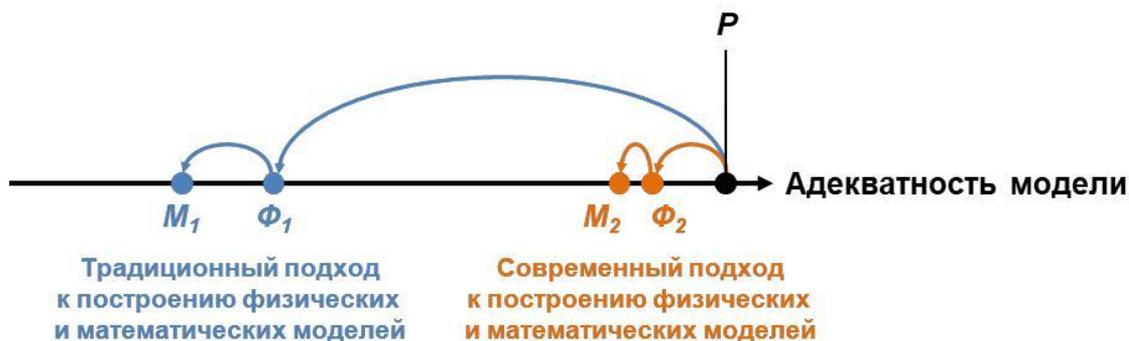


Рис. 6. Сравнительный анализ традиционного и современного подходов к построению физических математических моделей (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [22]):

P – реальный объект; Φ_1, Φ_2 – физические модели; M_1, M_2 – математические модели

За счет применения новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования стало возможным уйти от традиционной ситуации, когда число изменений изделия (в силу допущенных ошибок или полученных новых, ранее не учтенных сведений) и, соответственно, возрастающие затраты на их внесение распределяются на протяжении всего жизненного цикла разработки – от стадии проектирования до начала серийного производства (известно, что чем позже вносятся изменения, тем бóльшие издержки несет компания). В итоге становится возможным сосредоточить основную долю изменений и затрат на стадии проектирования и тем самым значительно минимизировать общий объем затрат, сократить издержки обеспечить создание наукоемких высокотехнологичных изделий нового поколения в кратчайшие сроки (рис. 7).

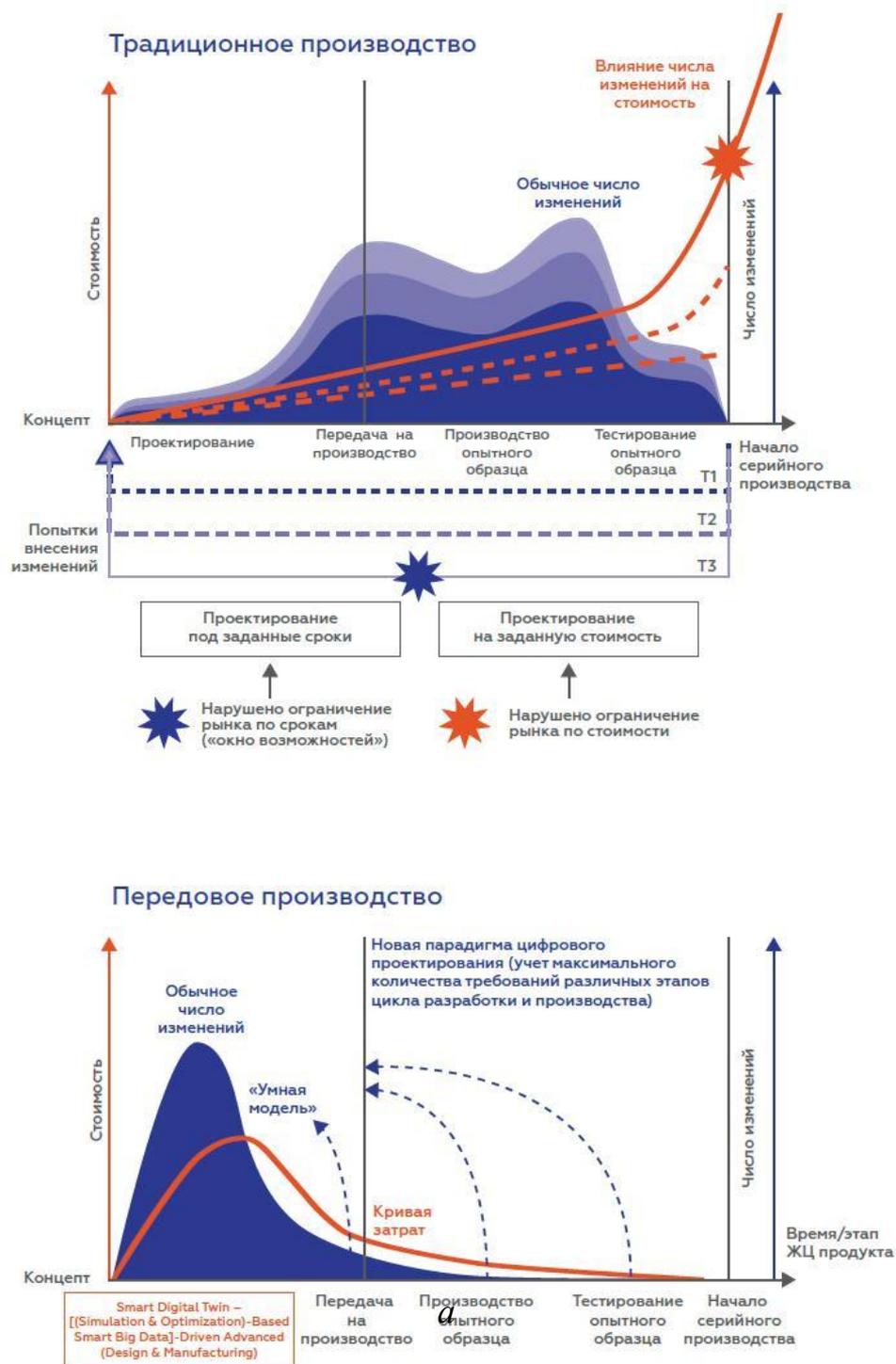


Рис. 7. Сравнение традиционного (а) и передового (б) производств (источник:

Центр НТИ СПбПУ по материалам [23])

Смещение «центра тяжести» в конкурентной борьбе в сторону проектирования было отмечено в 2015 г. американской аналитической компанией CIMdata, которая специализируется на оказании услуг стратегического консалтинга поставщикам PLM-решений и высокотехнологичным компаниям.

Еще ранее, в 1993 г., Университет подготовки специалистов по военным закупкам США (DAU), проведя статистический анализ проектов американского Министерства обороны, выявил, что реальные затраты на протяжении всего жизненного цикла изделия (с накопленным итогом) распределяются следующим образом: концептуальное проектирование (Concept) – 8 %, проектирование (Design) – 15 %, разработка (Develop) – 20 %, испытания и производство (Test/Prod) – 50 %, эксплуатация вплоть до утилизации (Operations through Disposal) – 100 %. При этом, например, к окончанию стадии проектирования до 85 % затрат на протяжении всего жизненного цикла изделия становятся законтрактованными обязательствами («committed costs») в силу уже принятых проектных решений, хотя реальные накопленные затраты к тому моменту составляют лишь 15 % от затрат на протяжении всего жизненного цикла изделия. Поэтому стоимость исправления допущенных ошибок многократно возрастает – чем позже вносятся изменения, тем дороже они обходятся (рис. 8) [24, 25].



Рис. 8. Стоимость исправления ошибок и внесения изменений на разных стадиях разработки продукта (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [24])

Очевидно, что в рамках разворачивающейся четвертой промышленной революции лидерами будут становиться именно те компании, которые, находясь в глобальных тенденциях цифровой экономики, переносят акценты своей деятельности в область цифрового проектирования и моделирования, компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга вместе с методами многокритериальной, многопараметрической, междисциплинарной, топологической и топографической оптимизации, бионического дизайна, аддитивного производства, роботизации и т. д. [26, 27].

В основе новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования лежит использование сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, конструкциям и физико-механическим процессам (включая технологические и производственные), описываемых уравнениями математической физики, в первую очередь, 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных.

Такие математические, или «умные», модели, агрегируют в себе все знания, которые применяются при проектировании, производстве и эксплуатации изделия, продукта, конструкции, машины, установки, технической или киберфизической системы:

1) фундаментальные законы и науки (математическая физика, теории колебаний, упругости, пластичности и т. д., механика разрушения, механика композиционных материалов и композитных структур, контактного взаимодействия, динамика и прочность машин, вычислительная механика, гидроаэродинамика, тепломассообмен, электромагнетизм, акустика, технологическая механика и др.);

2) геометрические (CAD) и вычислительные конечно-элементные (CAE) полномасштабные модели реальных объектов и физико-механических процессов (например, узлов и механизмов, их кинематических, динамических и прочностных особенностей, а также сопряжений элементов конструкции между собой посредством сварных точек и швов, клеевых соединений, для каждого из которых характерны свои модели поведения при различных воздействиях);

3) полные данные о материалах, из которых изготавливается изделие, включая данные об их поведении при воздействии тепловых, электромагнитных и других полей, скоростном деформировании, вибрационном, ударном, мало- и многоцикловом нагружении (опыт решения сложных промышленных задач показывает, что, например, для изготовления кузова автомобиля премиум-класса применяется около 200 материалов, среди которых металлы, сплавы, полимеры, композиционные материалы, наконец, метаматериалы с оптимальной микроструктурой. Для корректного описания физико-механических процессов, проходящих конструкции при различных воздействиях, например динамических, для каждого материала необходимо знать обширный набор параметров и характеристик, включая кривые упруго-пластического деформирования при различных скоростях деформирования, критерии начала разрушения, модели его развития и накопления повреждений в материалах и т. д.);

4) информацию об эксплуатационных режимах (нормальные условия эксплуатации, нарушения нормальных условий эксплуатации, аварийные ситуации и т. д.), включая ту, которая обеспечивает заданное поведение конструкции в тех или иных ситуациях (так называемое программируемое поведение – например, нелинейные деформирование и разрушение элементов конструкции автомобиля в 5 000...8 000 сварных точках при различных вариантах возможных столкновений позволяют достичь необходимый высокий уровень пассивной безопасности, обеспечить выживание и минимальную травмируемость водителя и пассажиров);

5) данные о технологиях производства и сборки как отдельных элементов, так и конструкций в целом (например, «интеллектуальное» литье, «интеллектуальная» штамповка, учет предварительного напряженно-деформированного состояния, управление им, учет локальных утонений, короблений деталей после технологических процессов, а также виртуальная оценка технологичности деталей – возможно ли изготовить их тем или иным способом, будет ли обеспечен требуемый уровень прочности, качества изготовления и сборки компонентов и др.);

6) прочие характеристики и параметры (например, полные виртуальные аналоги всего испытательного оборудования, всех испытательных стендов, которые применяются при проведении натурных испытаний).

Конечно, такое агрегирование всех знаний, которые используются при создании продукта, является лишь необходимым, но никак не достаточным условием для формирования «умных» моделей. Более важными представляются следующие ключевые компетенции, без которых формировать «умные» модели невозможно:

1. Кастомизация: «умная» модель всегда формируется из «best-in-class» технологий мирового уровня, при этом данная компетенция предполагает одновременно и способность мгновенно откликнуться на запрос Заказчика, который сам определяет круг используемых технологий, и способность решить инженерно-технологическую проблему-вызов для Заказчика, которому неважно, с помощью каких технологий это будет сделано.

2. Системный инжиниринг: в каждый момент времени необходимо держать в поле зрения всю систему и все её взаимодействующие компоненты, чтобы не происходило ситуаций, когда улучшение характеристик одного компонента влечет за собой ухудшение характеристик другого. Это особенно важно, поскольку известно, что в конечном итоге конкурентоспособность изделия определяется его наиболее слабыми компонентами, а не теми, которые спроектированы или произведены на мировом уровне.

3. Многоуровневая матрица целевых показателей и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных и т. д.): опыт решения сложных промышленных задач Инжиниринговым центром СПбПУ и ГК CompMechLab по заказам лидирующих мировых компаний свидетельствует, что такая матрица содержит десятки тысяч (примерно 40 000 ... 60 000) целевых показателей и требований, предъявляемых к продукту в целом, к его компонентам и деталям в отдельности, а также ресурсных ограничений.

Принципиально важно понимать, что как бенчмарк-продукт, целевые характеристики, так и ресурсные ограничения могут претерпеть изменения или уточнения, что потребует внесения в кратчайшие сроки (например, в течение недели) изменений в многоуровневую матрицу – «управление изменениями», которое обеспечивает непрерывный характер разработки и представляет собой другую важнейшую особенность новой парадигмы проектирования.

Другими словами, многоуровневая матрица целевых показателей и ресурсных ограничений позволяет гибко реагировать на действия конкурентов, а значит, в конечном итоге учитывать триаду требований современного глобального рынка – сокращение времени принятия решений (Time-to-Decision, T2D), их исполнения (Time-to-Execution, T2E) и вывода продукции на глобальный рынок (Time-to-Market, T2M).

4. Валидация «умных» моделей: в цифровую форму должны быть переведены результаты натурных испытаний, в первую очередь тех, которые проводились для доводки изделий различных отраслей еще во времена СССР. Известно, например, что в авиакосмической отрасли потенциал физических и особенно математических моделей, которые лежат в основе большинства конструкций и интегрируют опыт и знания предыдущих поколений инженеров, практически исчерпан. В свое время были истрачены огромные финансовые средства на доводку изделий посредством натурных испытаний, в результате чего был достигнут предел в применяющихся инженерных решениях. Это означает, что, продолжая вносить в них минимальные изменения, невозможно вывести на рынок продукт нового поколения,

поскольку уже нет тех финансовых возможностей для проведения дорогостоящих экспериментов, которые были у советских генеральных конструкторов.

Здесь уместно перефразировать известное изречение И. Ньютона о своих успехах: «Если я видел дальше других, то потому лишь, что стоял на плечах гигантов» в выражение «Достижения наших инженеров должны быть обусловлены тем, что мы стоим на плечах оцифрованных гигантов», где имеются в виду именно оцифрованные технологические заделы советских генеральных конструкторов.

5. «Цифровая сертификация»: бизнес-процесс, целью которого является прохождение с первого раза всего комплекса натуральных, сертификационных, рейтинговых и прочих испытаний. Разработка изделия в рамках этого бизнес-процесса с самого начала ведется на основе «best-in-class» технологий мирового уровня, системного инжиниринга, многоуровневой матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений, валидации «умных» моделей и, самое главное, с помощью выполнения десятков тысяч виртуальных испытаний каждого компонента (узла, детали, механизма, сопряжения и т. д.), материалов и всей системы в целом. Это позволяет управлять поведением буквально каждого кубического миллиметра конструкции и контролировать его на всех этапах жизненного цикла.

Опыт решения сложных промышленных задач Инжиниринговым центром СПбПУ и ГК CompMechLab по заказам лидирующих мировых компаний показывает, что за последние 10 лет у лидеров мирового автомобилестроения произошло радикальное изменение соотношения числа натуральных и виртуальных испытаний: если в 2007 г. их соотношение было 100 к 100, то в 2017 г. – уже 5 к 10 000!

Продемонстрируем «цифровую сертификацию» на примере реализации проекта государственного значения по созданию отечественного автомобиля премиум-класса (проект «Кортеж») на основе разработки Единой модульной платформы для производства лимузина, седана, внедорожника и микроавтобуса для перевозки и сопровождения первых лиц государства (головной исполнитель – ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», зона ответственности Инжинирингового центра СПбПУ – проектирование и разработка конструкторской документации для производства кузовов всех четырех автомобилей).

Натурные испытания на безопасность по программе Euro NCAP (краш-тесты) состоялись 2 июня 2016 г. на независимом полигоне в Берлине, где седан проекта «Кортеж» с первой попытки получил высший балл – 5 звезд. Это подтвердило высочайший уровень адекватности разработанных «умных» моделей кузовов и проведенных виртуальных испытаний на безопасность реальным автомобилям и натурным экспериментам [28].

Натурный краш-тест является наиболее полной и сложной оценкой качества и безопасности автомобиля. Каждый автомобиль должен удовлетворять всем требованиям серии сертификационных и рейтинговых испытаний, для того чтобы обеспечить его глобальную конкурентоспособность на мировом рынке.

Виртуальный краш-тест автомобиля является мультидисциплинарной вершиной, в которой представлены практически все науки – от материаловедения и механики до технологий изготовления, все физико-

механические процессы, связанные с аэродинамикой, вибрациями, динамикой, прочностью и усталостью, все типы нелинейностей (геометрические, физические, контактные взаимодействия, накопление повреждений, локальные разрушения и т. д.), а также широко применяется весь спектр технологий оптимизации и т. д.

Виртуальный краш-тест автомобиля – быстропротекающий динамический процесс, длительность которого составляет порядка 200...250 мс. Шаг интегрирования для численного решения задач составляет 1 мкс. Общее количество шагов интегрирования – более 200 000. Вся эта информация образует большие данные (Smart Big Data) «на входе» (более $2 \cdot 10^{12}$ параметров) «умной» модели. Проведенные виртуальные испытания дополняют этот массив – получаем Smart Big Data «на выходе»: при суперкомпьютерном моделировании процесса длительностью 200 мс «на выходе» получается массив данных, содержащий более 10^{14} параметров. В нескольких десятках миллионов узлов (приблизительно $(1...3) \cdot 10^7$) регулярно «считываются» более 50 параметров, таких как перемещения, скорости, ускорения, деформации, напряжения и др. В итоге получается $5 \cdot 10^8$ кривых, исчерпывающе описывающих поведение «умной» модели.

В настоящее время, по сообщениям Министра промышленности и торговли РФ Д. В. Мантурова, ведется опытная эксплуатация автомобилей проекта «Кортеж», партия машин передана в Гараж особого назначения ФСО России, а публичная презентация намечена на день инаугурации Президента РФ [29].

Опыт взаимодействия Инжинирингового центра СПбПУ с предприятиями, производящими военную продукцию или продукцию двойного назначения, показывает, что «цифровая сертификация» является актуальной. Это связано с тем, что в рамках выполнения гособоронзаказа и диверсификации ОПК предприятиям выделяется такой объем финансовых средств, который предполагает проведение лишь нескольких (как правило, одного-двух) дорогостоящих натурных испытаний. Очевидно, что с использованием традиционных подходов становится невозможно итерационным путем корректировать математическую расчетную модель, рабочую конструкторскую документацию, а по итогам – и доводку конечного изделия до требуемых целевых характеристик.

При этом в отечественной промышленности представлены в основном геометрические 3D-модели, на основе которых выполняются достаточно простые кинематические, статические, динамические и вибрационные расчеты, результаты которых обладают, как правило, низким уровнем адекватности реальным объектам и процессам. Полученные численные результаты, естественно, не могут пройти валидацию по результатам натурных испытаний, поскольку постоянно наблюдаются большие расхождения в поведении реальных объектов и цифровых моделей или расхождения в информации, которую фиксируют установленные датчики и показывают цифровые модели. Соответственно, такие модели не позволяют воспроизвести с высокой точностью поведение объектов на протяжении всего их жизненного цикла, а попытка делать это на ранних этапах разработки цифровых моделей, еще до того, как они стали более адекватными реальности, оборачивается «фальстартом», который передаёт «эстафету» проблем и несоответствий на следующие этапы жизненного цикла продукта, при этом возрастают издержки

и, соответственно, затраты, кроме того, увеличивается общее время вывода изделия на рынок.

«Умная» модель за счет своей высокой адекватности, благодаря, в первую очередь, Smart Big Data «на входе» и «на выходе», позволяет значительно «приблизиться» к реальному объекту – обеспечивает отличие между результатами виртуальных и натуральных испытаний в пределах $\pm 5\%$ (например, валидация «умных» моделей в краш-тестах в автомобилестроении происходит приблизительно по 500 датчикам). Именно такую высокоадекватную модель, как правило, называют цифровым двойником объекта / продукта (Digital Twin, DT1).

Как было продемонстрировано на примере автомобильного краш-теста, большой вклад в адекватность модели вносят данные о технологиях изготовления (например, «интеллектуальное» литье, «интеллектуальная» штамповка, учет предварительного напряженно-деформированного состояния, утонения и коробления деталей после технологических процессов). Соответственно, высокоадекватную «умную» модель с учетом особенностей конкретного производства будем называть цифровым двойником этого производства (Digital Twin, DT2).

Необходимо подчеркнуть, что для успешного формирования цифровых двойников объекта / продукта (DT1) и производства (DT2) требуется объединить функции традиционных инженеров-конструкторов, технологов, материаловедов, расчетчиков и др., что формирует совершенно новый тип инженера – «системный инженер».

Объединение цифрового двойника объекта / продукта (Digital Twin, DT1) и цифрового двойника производства (Digital Twin, DT2) в рамках единой цифровой модели на основе выполнения десятков тысяч виртуальных испытаний в процессе специальным образом организованной «цифровой сертификации» позволяет сформировать «умный» цифровой двойник первого уровня (Smart Digital Twin, SDT1).

Впоследствии, уже на этапе эксплуатации, включая, например, ремонт, SDT1 делает возможным «порождение» «умной» цифровой тени (Smart Digital Shadow, SDS) на основе «умной» модели, которая адекватно описывает поведение реального объекта / продукта на всех режимах работы (например, пуски и остановки, нормальные условия работы, нарушения нормальных условий работы, аварийные ситуации и др.). Формирование SDS происходит за счет получения оперативной информации о функционировании конкретного объекта продукта при помощи технологий промышленного Интернета и диагностики (Health Monitoring System, HMS). Эта дополнительная информация, полученная на этапе эксплуатации, позволяет продолжить «обучение» SDT1, делая его еще более «умным», повышая его уровень адекватности и позволяя в дальнейшем моделировать с его помощью различные возможные и непредвиденные ситуации, включая их комбинации и «наложения», а также эксплуатационные режимы (например, оценивать уровень возможных повреждений или остаточный ресурс). Благодаря десяткам тысяч проведенных в процессе «цифровой сертификации» виртуальных испытаний при создании SDT1, есть четкое представление о расположении критических зон, в которых имеет смысл размещать те или иные датчики (акселерометры, тензометры, датчики температуры, давления, скорости и т. д.). Это позволяет радикально сократить число самих датчиков и регулярно

(например, ежедневно) получаемый объем больших данных (фактически вместо Big Data формируется Smart Big Data), увеличить скорость их обработки и внесения необходимых изменений в SDT1 для его трансформации в «умный» цифровой двойник второго уровня (SDT2) (рис. 9 и 10).

Принципиально важным представляется отличие SDS от понятия цифровой тени (Digital Shadow, DS). В этом случае под цифровой тенью понимается низкоадекватная геометрическая 3D-модель, уровень адекватности которой пытаются повысить за счет длительных и дорогостоящих натурных испытаний или режимов эксплуатации и поступающих данных с избыточного количества датчиков на реальном объекте.

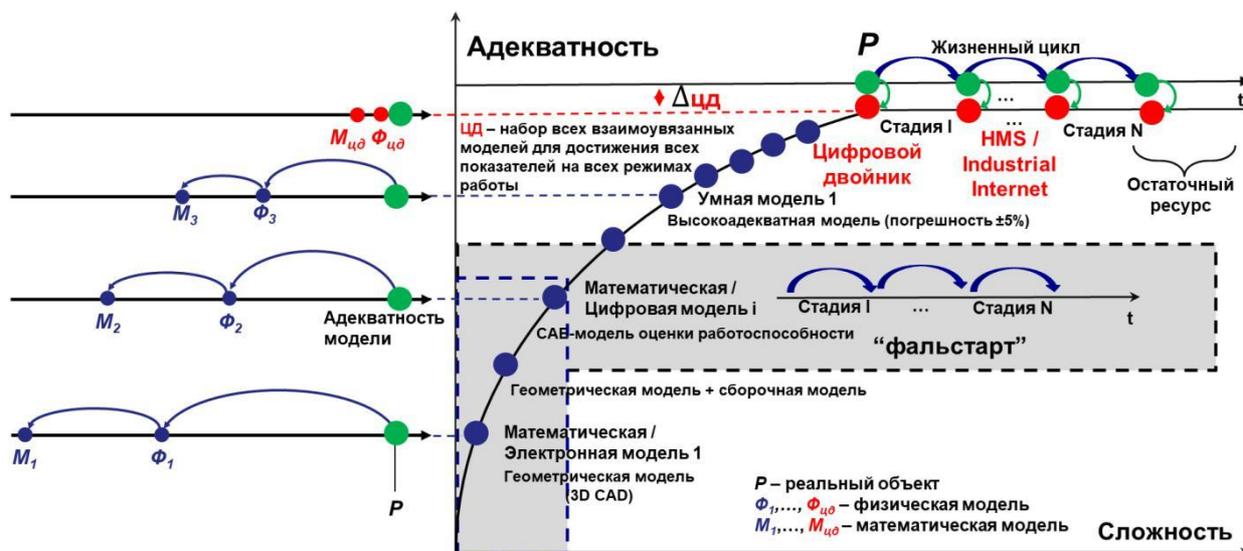


Рис. 9. Традиционный и современный подход к построению физических и математических моделей (источник: Центр НТИ СПбПУ):

P – реальный объект; $\Phi_1, \dots, \Phi_{цд}$ – физические модели; $M_1, \dots, M_{цд}$ – математические модели

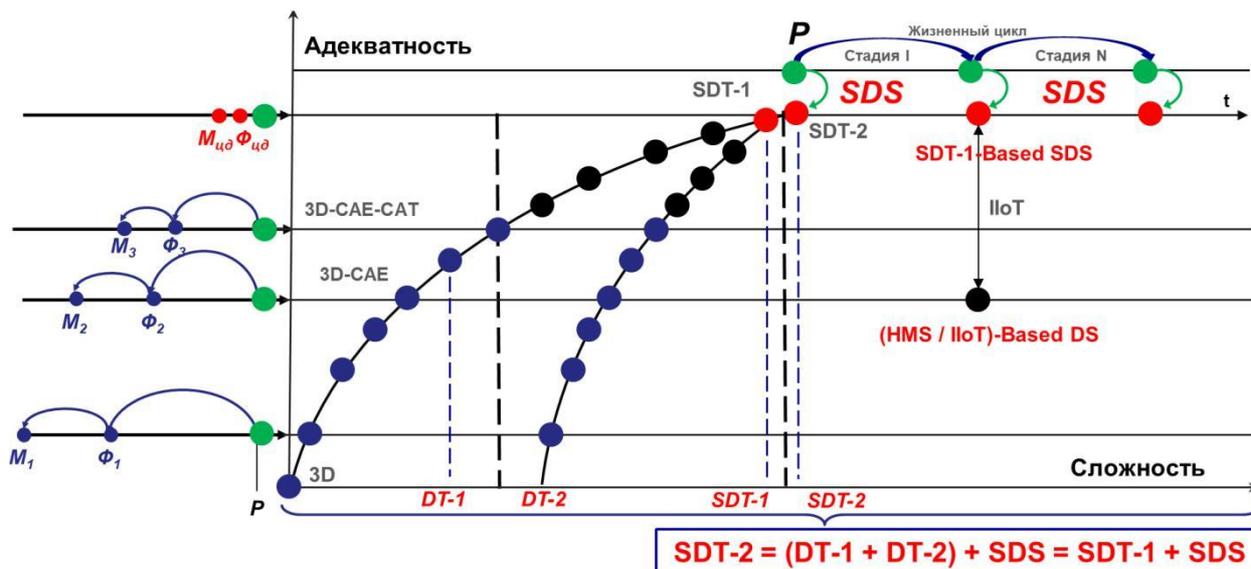


Рис. 10. Семейство физических и математических моделей (источник: Центр НТИ СПбПУ):

DT □ цифровой двойник; SDT □ «умный» цифровой двойник; DS □ цифровая тень; SDS □ «умная» цифровая тень

Таким образом, новая парадигма (New Paradigm) проектирования основана на разработке процессе «цифровой сертификации» и применении семейства Smart Digital Twins (DT1, DT2, SDT1, SDT2 и т. д.). Эту новую парадигму кратко можно выразить формулой Smart Digital Twin – [(Simulation & Optimization)-Based Smart Big Data]-Driven Advanced (Design & Manufacturing) – передовые проектирование и производство, драйвером которых является «умный» цифровой двойник, формируемый в результате мультидисциплинарного (Multi-Disciplinary) / многомасштабного (MultiScale) численного моделирования и применения многих технологий оптимизации (MultiCriteria, MultiParametric, MultiDisciplinary, Topology, Topography, Sizing, Shaping и др.) на основе специальным образом генерируемых «умных» больших данных (Smart Big Data) «на входе» и «на выходе».

Понятно, что детально разработанная и эффективно применяемая для решения задач во многих отраслях высокотехнологичной промышленности новая парадигма проектирования чрезвычайно мало имеет общего с геометрической 3D-моделью и простейшими расчетами, с которыми зачастую ассоциируется цифровое проектирование и моделирование. В Инжиниринговом центре СПбПУ и ГК CompMechLab весь процесс цифрового проектирования и моделирования, включая формирование многоуровневой матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений, а также разработки «умных» моделей и цифровых двойников в процессе «цифровой сертификации» (выполнения десятков тысяч виртуальных испытаний) проводится на основе специализированной CML-Цифровой платформы CML-Bench (разработка российской ГК CompMechLab, которая в 2017 г. была удостоена Национальной промышленной премии РФ «Индустрия»). Эта платформа обеспечивает высокую степень автоматизации процесса разработки на основе лучших передовых технологий мирового уровня («экосистемы «best-in-class» технологий»), общая трудоемкость разработки и сопровождения

которых превышает 1 000 000 человеколет, а стоимость разработки превышает 100 млрд долларов. Для одновременного удовлетворения в процессе проектирования десяткам тысяч целевых показателей и ресурсных ограничений применяется специально разработанная CML-Экспертная интеллектуальная система CML-AI (разработка Comp-MechLab), которая является системой «интеллектуальных помощников» и целенаправленно развивает направление применения искусственного интеллекта в наиболее сложном и творческом процессе – процессе проектирования (рис. 11).

Этот новый подход, отвечающий глобальным тенденциям четвертой промышленной революции и цифровой экономики, позволяет проводить разработки быстрее, дешевле и с помощью значительно меньшего числа работников, а также существенно снижает количество возможных изменений и уточнений на этапах производства и эксплуатации, заметно уменьшает объемы натурных испытаний, наконец, позволяет динамично и эффективно управлять изменениями целевых характеристик и учитывать новые ограничения, которые возникают на этапах проектирования, производства или эксплуатации.

Несмотря на свою ключевую роль в четвертой промышленной революции и планомерную эффективную разработку на протяжении последних десяти лет транснациональными высокотехнологичными лидирующими мировыми компаниями, начиная с тотальной «дигитализации» и создания цифровых макетов (Digital Mock-Up, DMU), цифровой двойник лишь в августе 2017 г. впервые появился на цикле зрелости технологий Гартнера (Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies). Такое позднее появление, вероятно, связано с тем, что эти компании специально задержали размещение Digital Twin на кривой, потому что именно эта ключевая технология создает отрыв, основу для технологического превосходства (рис. 12).

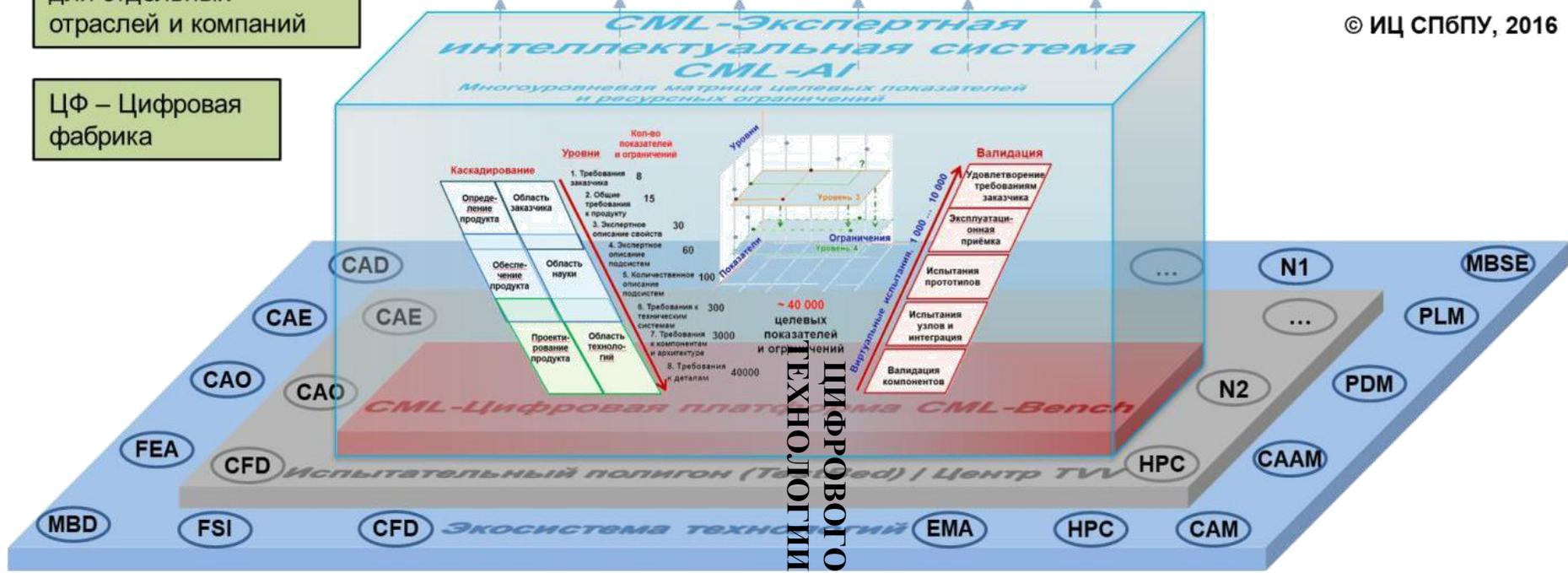
Управление данными / знаниями / компетенциями / проектами / изменениями / вызовами

Цифровые фабрики для отдельных отраслей и компаний

ЦФ – Цифровая фабрика

ЦФ-1 ЦФ-2 ЦФ-3 ЦФ-4 ... ЦФ-N

© ИЦ СПбПУ, 2016



- Ключевые компетенции:**
- 1. “Мгновенная” кастомизация
 - 2. Системный инжиниринг
 - 3. Многоуровневая матрица целевых показателей и ресурсных ограничений
 - 4. Валидация / Адекватность моделей
 - 5. “Цифровая сертификация”
 - 6. ...

Рис. 11. Экосистема технологий, испытательный полигон (TestBed), CML-Цифровая платформа CML-Bench, CML-Экспертная интеллектуальная система CML-AI, Цифровые фабрики (ЦФ) (источник: Центр НТИ СПбПУ)

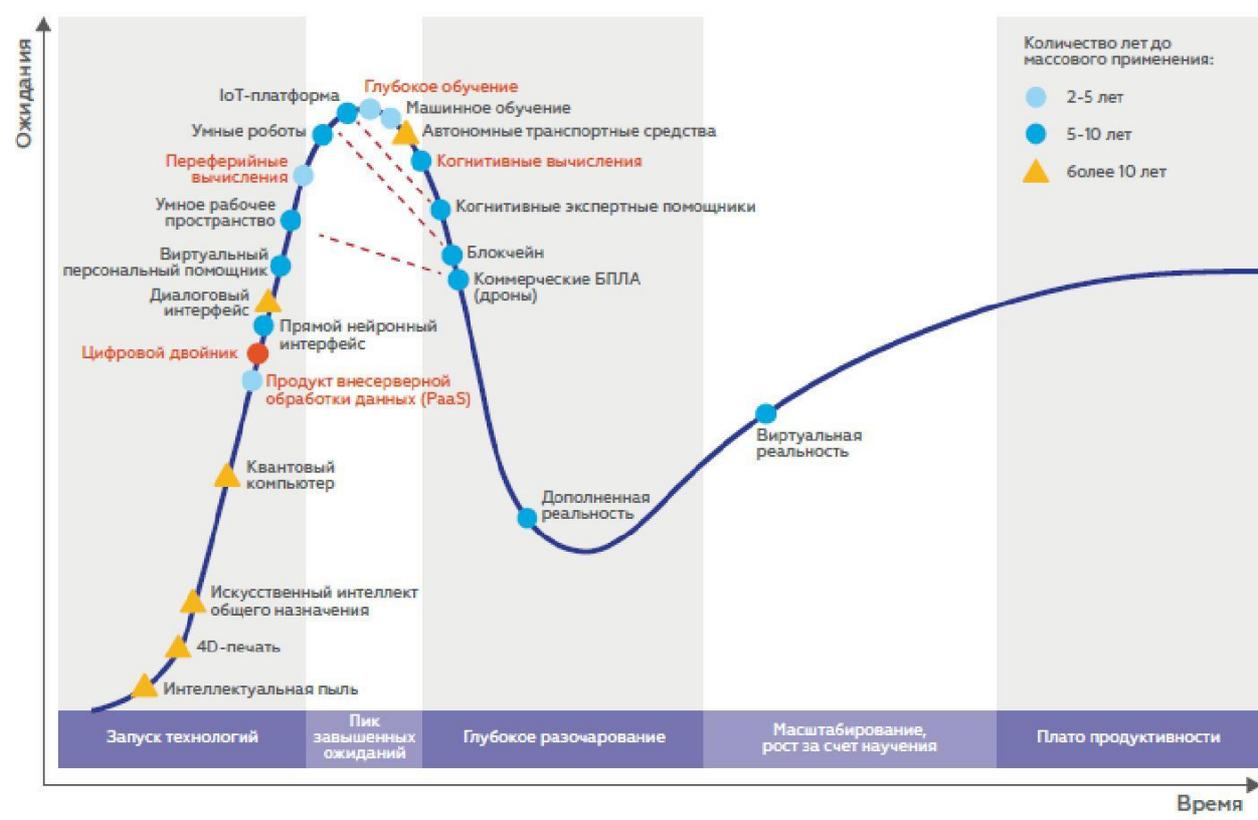
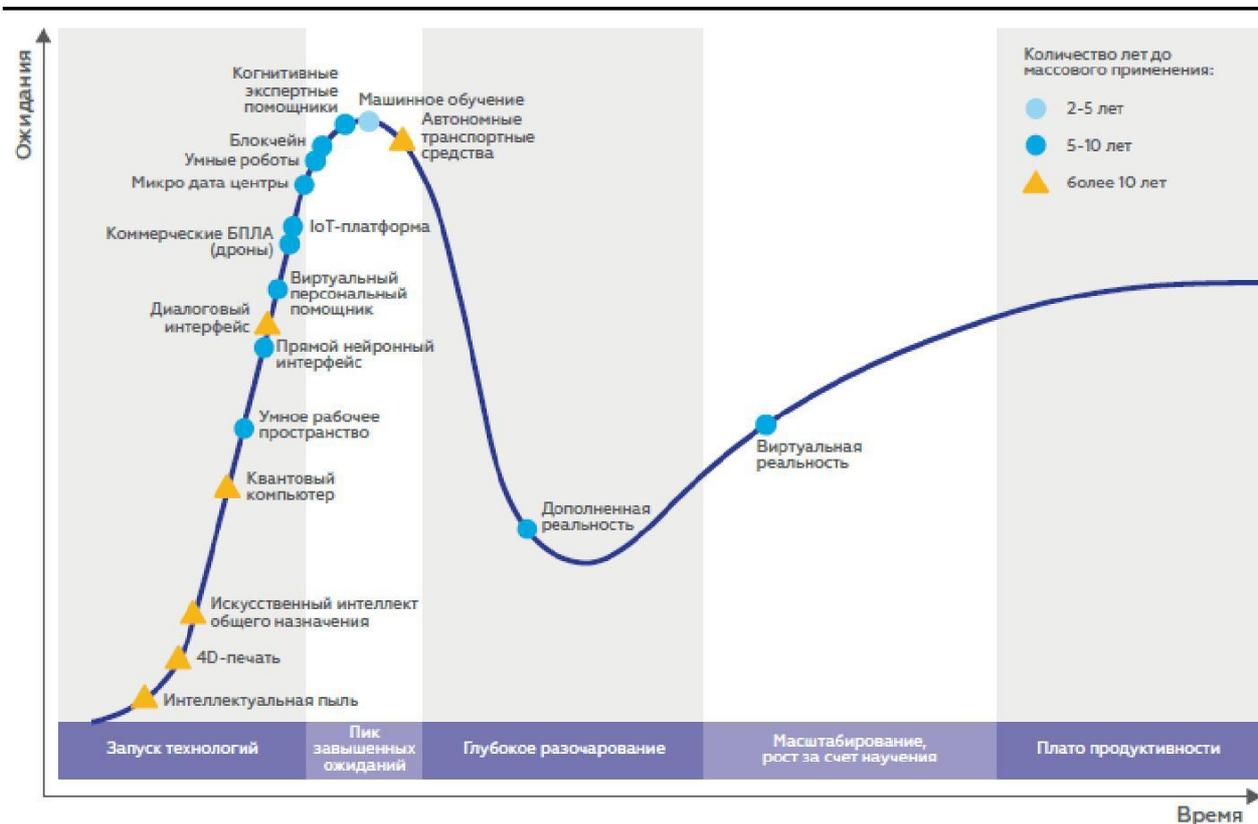


Рис. 12. Отдельные производственные технологии на цикле зрелости технологии Гартнера 2016 г. (а) 2017 г. (б) (Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies) (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [30, 31])

Неслучайно на протяжении последних 5–7 лет цифровые двойники находятся в фокусе внимания военно-промышленного комплекса США. Примерно с 2010 г. Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) регулярно указывает цифровые двойники в своих технологических дорожных картах, а с 2011–2012 гг. это понятие используется в контексте разработки истребителя следующего поколения и космических аппаратов [32].

В 2013 г. в документе военно-воздушных сил США «Global Horizons. United States Air Force Global Science and Technology Vision» («Глобальные горизонты. Глобальное научно-технологическое видение ВВС США») цифровые двойники были названы «фактором, радикально меняющим существующее положение дел» (Game Changers) [33]. Примечательно, что наряду с цифровыми двойниками в разделе 9 документа, касающемся производства и материалов, такими факторами также указаны передовые производственные технологии и новая парадигма сертификации и аттестации продукции, полученной с использованием этих технологий.

В документе ВВС США понятие цифрового двойника используется в тесной связи с понятием «цифровая нить» (Digital Thread). Согласно научно-технологическому видению военно-воздушных сил Digital Thread и Digital Twin состоят из программных систем передового моделирования, которые соединяют материалы, проектирование, производственные, технологические процессы и производство. Цифровой двойник и «цифровая нить» обеспечивают оперативность и кастомизацию под определенные задачи, необходимые для разработки и принятия самолетов на вооружение [33].

Цифровой двойник является виртуальным представлением военного самолета, которое понимается как система данных, моделей и программных систем численного моделирования, применяемых на протяжении всего жизненного цикла изделия и позволяющих отслеживать каждый конкретный самолет и работу каждого члена наземного обслуживающего персонала. При этом системы численного моделирования (Modeling & Simulation) должны с самого начала разработки обеспечить производственную технологичность, возможность проведения осмотров и длительную эксплуатацию, а данные, полученные со старых и новых самолетов, позволят вносить коррективы в имеющиеся модели и прогнозировать поведение как на уровне всей системы, так и на уровне отдельных компонентов [33, 34] (рис. 13).

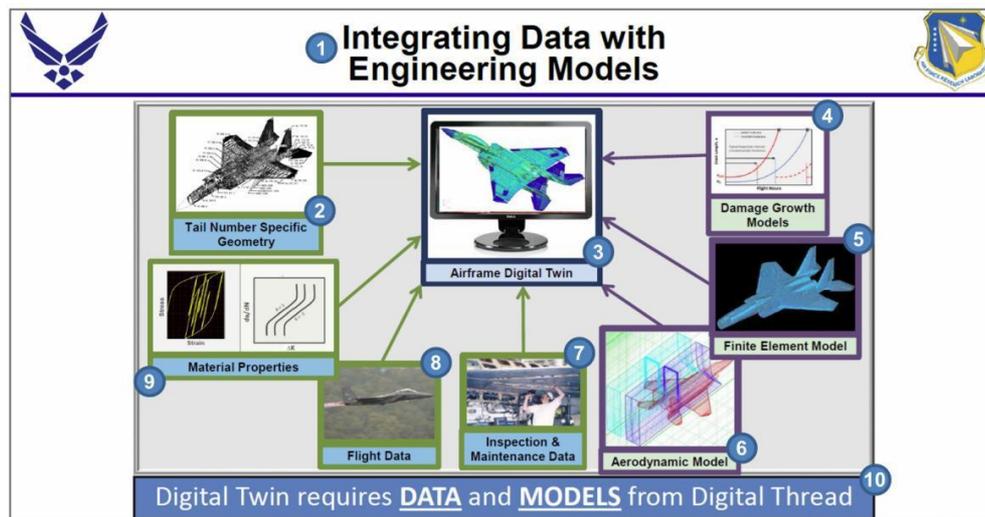


Рис. 13. Структура цифрового двойника планера по методике Исследовательской лаборатории ВВС США (AFRL) (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [34]):

1 □ интеграция данных с техническими моделями; 2 □ оцифрованная геометрия конкретного самолета; 3 □ цифровой двойник планера самолета; 4 □ модели накопления повреждений; 5 □ конечно-элементная модель; 6 □ аэродинамическая модель; 7 □ данные осмотров и техобслуживания; 8 □ полетные данные;

9 □ свойства материалов; 10 □ цифровой двойник требует данные и модели, получаемые из «цифровой нити»

Важным является следующее различие в определении понятий Digital Thread и Digital Twin: «цифровая нить» □ скорее «технология создания и использования цифрового двойника военной техники для проведения динамической оценки ее состояния и возможностей в реальном времени для лучшего принятия решений по закупкам», в то время как цифровой двойник представляет собой «техническое описание системы вооружения, основанное на физических данных, в результате генерации, управления и применения данных, моделей и информации из достоверных источников на протяжении всего жизненного цикла такой системы» [35].

Очевидно, что для России компетенции в создании цифровых двойников (DT1 & DT2) «умных» цифровых двойников (SDT1 & SDT2) обеспечивают достижение целей диверсификации ОПК (Enabling Technology). Они позволяют за короткие сроки (от нескольких месяцев до 1,5-2 лет) осуществить «двойной скачок» (Double Leapfrogging), начиная с текущего (не очень высокого) российского уровня разработок до мирового, а затем и опередить лидирующие мировые компании, задав высокие темпы развития по сравнению с конкурентами.

На первом этапе возможно создать цифровой двойник бенчмарк-продукта за счет использования реверсивного инжиниринга, парадигмы открытых инноваций (а при необходимости – и промышленного шпионажа), высокопроизводительных вычислений и т. д. На втором этапе за счет суперкомпьютерного инжиниринга вместе с методами многокритериальной, многопараметрической, междисциплинарной, топологической и топографической оптимизации, а также бионического дизайна и аддитивного производства обеспечиваются такие характеристики продуктов, которые значительно опережают характеристики продуктов у лидирующих мировых компаний, в результате чего становится возможным преодолеть технологическую отсталость и занять лидирующие позиции на рынке. Таким образом, в конкурентной борьбе на глобальных рынках побеждает тот, кто быстрее разрабатывает множества (семейства) «умных» цифровых двойников (рис. 14).

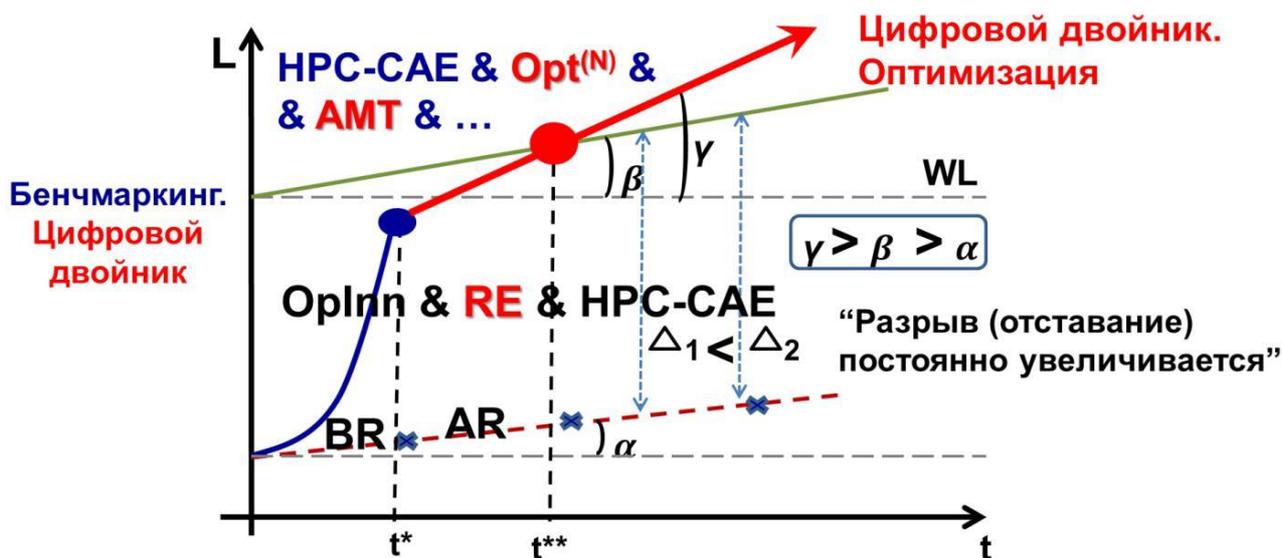


Рис. 14. Схема обеспечения глобальной конкурентоспособности за счет преодоления отставания посредством «двойного скачка» (источник: Центр НТИ СПбПУ):

BR □ фундаментальные исследования; AR □ прикладные исследования; WL – мировой уровень; ● □□ открытые инновации, □ реверсивный инжиниринг, □ высокопроизводительные вычисления, □

В России разработка цифровых двойников ведется в рамках создания Цифровых, «Умных», Виртуальных Фабрик Будущего (Digital, Smart, Virtual Factories of the Future). Концепция «Фабрик Будущего» реализуется в рамках дорожной карты «Технет» (передовые производственные технологии) НТИ и мегапроекта «Фабрики Будущего», нацеленного на развитие и повышение конкурентоспособности отечественной высокотехнологичной промышленности за счет решения инженерно-технологических проблем-вызовов (Industrial Challenge Problems) государственного значения, которые не удастся решить высокотехно-логичным предприятиям с помощью традиционных подходов (рис. 15). Мегапроект «Фабрики Будущего» был одобрен на расширенном заседании Наблюдательного совета АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов», состоявшемся 21 июля 2016 г. под председательством Президента РФ В. В. Путина, и по его итогам совместно с Минпромторгом России и высокотехнологичными корпорациями и компаниями ведется регулярная работа по формированию перечня перспективных долгосрочных проектов по направлениям НТИ для реализации проекта «Фабрики Будущего» [36].

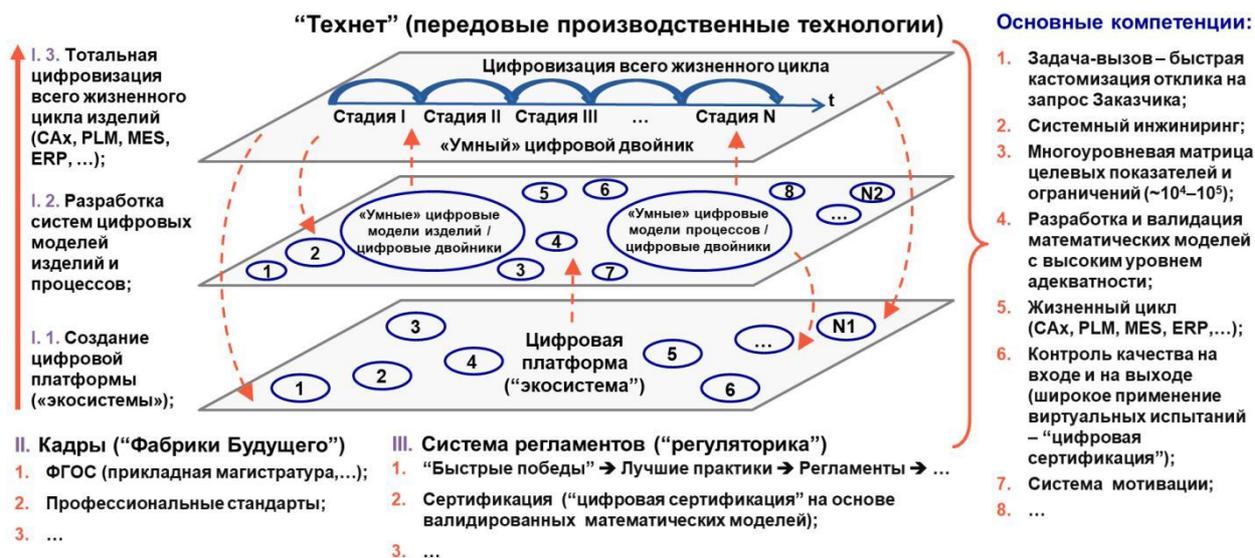


Рис. 15. Трехуровневая схема Фабрик Будущего, представленная 14 февраля 2017 г. в ходе одобрения дорожной карты «Технет» НТИ на заседании президиума Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию России под руководством Председателя Правительства РФ Д. А. Медведева (источник: Центр НТИ СПбПУ)

В настоящее время Инжиниринговым центром СПбПУ, ГК ComrMechLab, а теперь и в рамках Центра НТИ «Новые производственные технологии» на базе Института передовых производственных технологий СПбПУ (Центр НТИ СПбПУ) ведется активная работа по созданию Фабрик Будущего с высокотехнологичными предприятиями из различных отраслей промышленности: автомобилестроения (центральный институт отрасли «НАМИ», Ульяновский автомобильный завод, «Волгабас», КАМАЗ), двигателестроения («ОДК-Сатурн», «ОДК-Климов» и др.), судостроения и кораблестроения (Средне-Невский судостроительный завод, СПМБМ «Малахит» и др.), авиастроения и вертолетостроения (Объединенная авиастроительная корпорация, «Гражданские самолеты Сухого», Корпорация «Иркут», Авиационный комплекс им. С. В. Ильюшина и холдинг «Вертолеты России», КБ «Камов» и Московский вертолётный завод им. М. Л. Миля).

В 2017 г. в процессы цифровой трансформации по инициативе Президента Республики Татарстан Р. Н. Минниханова включились машиностроительные предприятия РТ: НПО «ОКБ им. М. П. Симонова», Казанское моторостроительное производственное объединение, Казанский вертолетный завод и КАМАЗ. В Санкт-Петербурге создан Проектный офис «Фабрики Будущего» (положение о Проектном офисе 25 июля 2017 г. подписал губернатор города Г. С. Полтавченко). В работу Проектного офиса активно включились руководители высокотехнологичных промышленных предприятий города, Союза промышленников и предпринимателей и профильных комитетов Правительства Санкт-Петербурга.

В 2017 г. Инжиниринговый центр СПбПУ с рабочими и официальными визитами посетили более 250 делегаций. Большая часть визитов – это встречи с потенциальными заказчиками, в том числе с представителями организаций ОПК России.

С 2015 г. по февраль 2018 г. Инжиниринговый центр СПбПУ посетили представители следующих предприятий, включенных в сводный реестр организаций ОПК [37]: Объединенная авиастроительная корпорация (Авиационный комплекс им. С. В. Ильюшина, Корпорация «Иркут»), холдинг «Вертолеты России» (Московский завод им. М. Л. Миля, КБ «Камов»), Объединенная двигателестроительная корпорация («ОДК-Сатурн», «ОДК-Климов»), Национальный институт авиационных технологий, НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина, Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова, Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, НПО «ОКБ им. М. П. Симонова», Концерн «Калашников», Кировский завод, Объединенная судостроительная корпорация (Средне-Невский судостроительный завод, СПМБМ «Малахит»), НПП «Аэросила», Концерн ВКО «Алмаз-Антей», Конструкторское бюро специального машиностроения, ГОЗ «Обуховский завод», Завод радиотехнического оборудования, Машиностроительный завод «Арсенал», НПО «Курганприбор», НПО «Стрела», КАМАЗ, ЦНИИ судового машиностроения, НПК «Уралвагонзавод», «ЗВЕЗДА», Завод им. Козицкого, «Компрессор», ЦНПО «Ленинец» холдинга «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ», ЦНИИ РТК, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Концерн «Гранит-Электрон», КБточмаш им. А. Э. Нудельмана, НПО «Орион», Корпорация «Тактическое ракетное вооружение», Концерн «МПО-Гидроприбор», компания «Молот-Оружие» и др. Кроме того, Инжиниринговый центр СПбПУ неоднократно посещало руководство Научно-исследовательского института (кораблестроения и вооружения ВМФ) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» и НПО «Конверсия».

Инжиниринговый центр СПбПУ 23 июня 2017 г. посетил заместитель председателя Коллегии Военно-промышленной комиссии О. И. Бочкарев, по итогам визита оформлен Протокол, в котором указаны организации ОПК для первоочередного взаимодействия. Затем 12 июля 2017 г. в Сарове на базе РФЯЦ-ВНИИЭФ состоялось заседание Совета главных конструкторов по системе вооружения сухопутной составляющей сил общего назначения, на котором с докладом выступал А. И. Боровков, и в Протоколе по итогам заседания указаны рекомендации по применению технологий цифровизации полного жизненного цикла образцов вооружения и военной техники общего назначения с использованием компетенций, опыта и ресурсов РФЯЦ-ВНИИЭФ и Инжинирингового центра СПбПУ.

Предметом вышеуказанных встреч и заседаний стали определение, обсуждение и формирование перечня инженерно-технологических проблем-вызовов предприятий ОПК. Востребованность подхода Инжинирингового центра СПбПУ обусловлена, в первую очередь, компетенциями в создании цифровых двойников (DT1 & DT2) и «умных» цифровых двойников (SDT1 & SDT2).

Успешным примером разработки «умного» цифрового двойника для предприятия ОПК является многолетнее сотрудничество Инжинирингового центра СПбПУ с ЦНИИ судового машиностроения. С 2004 г. по заказу этого предприятия специалисты центра участвовали в нескольких проектах по разработке новых аэрофинишёров взлетно-посадочного комплекса тяжелых авианесущих крейсеров (ТАВКР) «Адмирал Флота Советского Союза Горшков» и «Адмирал Флота Советского Союза Кузнецов».

Основные исходные характеристики для описания динамического процесса:

- скорость подлетающего самолета примерно 200...240 км/ч;
- масса подлетающего самолета около 20...30 т;
- время торможения самолета на палубе – до 3 с;
- пробег («путь торможения») самолета по палубе – менее 100 м;
- перегрузки, испытываемые летчиком при посадке на палубу не более 4,5 g.

В рамках проекта для полномасштабного моделирования аэрофинишёров были разработаны уникальные «умные» математические и конечно-элементные модели палубного аэрофинишёра, предназначенного для посадки самолетов на палубу ТАВКР, в том числе создана серия пространственных математических и конечно-элементных моделей гидравлической системы палубных демпферов, тормозной машины и концевых демпферов, определены необходимые гидравлические характеристики всех элементов трубопроводов, разработана математическая модель учета их взаимного влияния.

Были выполнены многовариантные динамические расчеты с целью моделирования процесса торможения при варьировании различных параметров (массы подвижных частей тормозной машины, массы летательного аппарата (ЛА), скорости зацепления ЛА за приемный трос, силы тяги, отклонения ЛА от курса при зацеплении за трос и т. д.). Также была проведена оптимизация существующей конструкции.

«Умный» цифровой двойник палубного аэрофинишёра был разработан на основе эффективного комплексирования и применения компьютерных технологий мирового уровня (CAD-CAE-FEA-CFD-FSI-MBD-CAO...), а также на основе CML-Цифровой платформы CML-Bench с помощью CML-Экспертной интеллектуальной системы CML-AI – системы специализированных интеллектуальных помощников [38, 39].

Проведенные работы позволили создать и отладить методику моделирования и исследования гидравлического тросового аэрофинишёра (рис. 16).

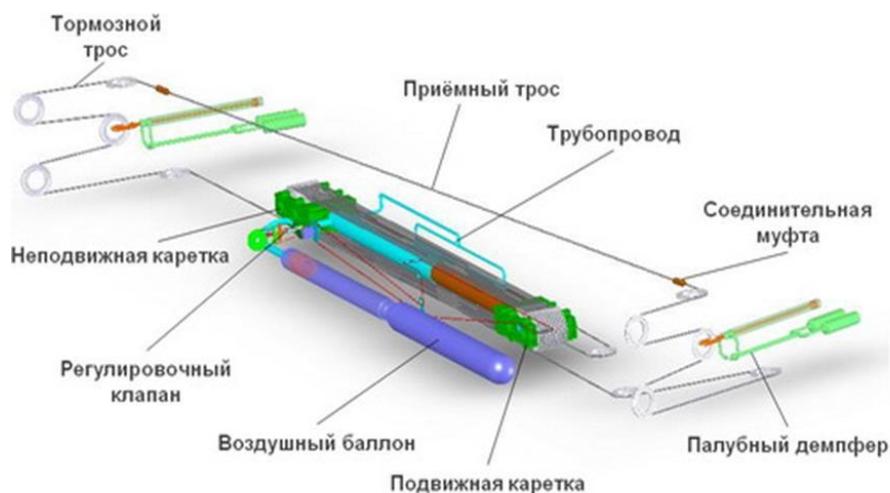


Рис. 16. Общий вид полномасштабной «умной» модели аэрофинишёра (источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [40])

По запросам Генеральной прокуратуры РФ, Военной прокуратуры Северного флота, Военного следственного управления Следственного комитета России по Северному флоту разработанные «умные» модели нашли широкое применение в расследовании двух авиационных происшествий – 5 сентября 2005 г. в Северной Атлантике во время плановых полетов морской авиации и 3 декабря 2016 г. в восточном Средиземноморье после боевого вылета в рамках военной операции российских ВКС в Сирии. В обоих случаях во время посадки самолетов произошел обрыв тормозного троса после зацепа гаком, в результате чего ЛА скатились с палубы, упали в море и затонули [40□42].

Подчеркнем важность и трудность реализованных более чем за 10 лет проектов. Аэрофинишёр является сложнейшей динамической системой, самой ответственной конструкцией любого авианесущего крейсера или авианосца, определяющей базовые функции и даже класс этих боевых кораблей.

Например, в феврале 2018 г. стало известно, что Управление советника главы Минобороны США по тестированию и диагностике вооружений рекомендовало отложить ударные испытания новейшего суперавианосца «Джеральд Р. Форд» до 2024 г., когда будет сдан второй корабль серии – «Джон Ф. Кеннеди». Причиной стала ненадежность электромагнитных катапульт новой разработки, аэрофинишёра, подъемников оружия и радара, которая может привести к тому, что авианосец станет непригодным для выполнения боевых задач, в частности, не будет обеспечена необходимая частота вылетов самолетов. Отметим, что «Джеральд Р. Форд» обошелся США в рекордные 12,9 млрд долларов. Корабль был заложен в 2009 г. и сдан флоту в 2017 г. [43].

В ноябре-декабре 2017 г. специалисты Инжинирингового центра СПбПУ совместно с НТЦ «Информтехника» – филиалом ФГУП «НИИСУ» приняли участие в проекте по разработке «Методических рекомендаций по организации цифрового производства на предприятиях ОПК» (далее Методические рекомендации), осуществлявшимся Минпромторгом России и направленным на организацию цифрового производства на предприятиях ОПК [44].

В Методических рекомендациях были установлены основные подходы к анализу использования технологий цифрового производства на предприятиях ОПК. Полученные результаты могут быть применены для определения приоритетных направлений развития предприятий и формирования состава первоочередных мероприятий по цифровизации процессов производственной деятельности.

В разработке Методических рекомендаций принимали участие ведущие научные и инжиниринговые компании: Российское технологическое агентство (Проектный офис Минпромторга России), РФЯЦ-ВНИИЭФ, инженерный центр TEKNER, консалтинговая фирма Claire&Clarté, корпорация «Галактика», компания СОЛВЕР и др.

В состав экспертного сообщества вошли представители промышленных и образовательных организаций – «Роскосмос», «Ростех», Объединенная судостроительная корпорация, компании «Аскон» и «Топ Системы», УрФУ, МГТУ «СТАНКИН», Объединенная авиастроительная корпорация, фирма «1С», МГТУ им. Н. Э. Баумана. Методические рекомендации были апробированы на следующих предприятиях: Средне-Невский судостроительный завод, Корпорация «Иркут», Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова, Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» им. Э. С. Яламова, Ижевский электромеханический завод «Купол» (рис. 17).



Рис. 17. Этапы разработки Методических рекомендаций [45]

Специалисты Инжинирингового центра СПбПУ выполнили обследование уровня цифровизации двух предприятий ОПК: Средне-Невского судостроительного завода (г. Санкт-Петербург) и Иркутского авиационного завода – филиала Корпорации «Иркут» (г. Иркутск).

Цели обследования:

- апробация методики получения информации об имеющихся элементах и планах развития цифрового производства;
- получение исходных материалов для разработки Методических рекомендаций. Обследование проводилось в пять этапов:

- 1) подготовительный этап;
- 2) этап обследования предприятия;
- 3) этап оценки уровня цифровизации предприятия;
- 4) этап определения приоритетных направлений цифровизации предприятия;
- 5) этап подготовки итогового отчёта.

На подготовительном этапе приказом руководителя каждого предприятия была создана рабочая группа по оценке уровня цифровизации предприятия и определению приоритетных направлений его развития в целях организации цифрового производства.

Обследование предприятий осуществлялось экспертами в сфере цифровизации путем наблюдения, обсуждения и фиксации данных в специальные формы самооценки.

Формирование массива исходных данных происходило путем заполнения форм самооценки уровня цифровизации предприятия, которые содержали следующие разделы:

- 1 – оценка уровня цифровизации предприятия;
- 2 – оценка уровня цифровизации производственных процессов;
- 3 – оценка уровня обеспечения информационной безопасности;
- 4 – использование аппаратного обеспечения импортного производства;
- 5 – использование глобальных технологий цифрового производства на предприятии.

В результате заполнения разделов была сформирована матрица оценки глубины внедрения элементов цифрового производства на обследуемых предприятиях. С помощью матрицы разработаны предложения по составу мероприятий для внедрения элементов цифрового производства на приоритетных направлениях.

На основании проведенной оценки был определен ряд мероприятий, результатом которых стало выявление актуальных для развития проблем. Также было сформировано видение путей цифровизации предприятий.

В ходе оценки предприятий ОПК стало возможным сделать убедительные выводы: о различиях уровня цифровизации обследованных предприятий; о влиянии на уровень цифровизации прочности кооперации по горизонтали (логистики, уровня развития цифровизации у контрагентов), по вертикали (между Заказчиком, Разработчиком и Производством), а также сложности и вида серийности выпускаемых изделий, производственной специфики каждой отрасли.

С целью оперативного решения вопросов, связанных с внедрением на предприятиях ОПК современных интегрированных информационных систем и технологий, были подготовлены предложения Минпромторгу России о создании нормативной технической документации, регламентирующей проектирование и производство вооружений, военной и специальной техники в цифровом формате.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Послание Президента Федеральному Собранию. 1 марта 2018 года. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/56957> (дата обращения: 01.03.2018).

2. Послание Президента Федеральному Собранию. 1 декабря 2016 года. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/53379> (дата обращения: 15.02.2018).

3. Совещание по вопросам использования потенциала ОПК в производстве высокотехнологичной продукции гражданского назначения. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/52852> (дата обращения: 15.02.2018).

4. Путин назвал основную задачу российской промышленности. URL: <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2018/01/24/748868-putin-nazval-osnovnuyu> (дата обращения: 15.02.2018).

5. Самофалова О. ВПК: важно не повторить ошибки «конверсии по-советски» // Взгляд. Деловая газета. 2017. 31 октября. URL: <https://vz.ru/economy/2017/10/31/892112.html> (дата обращения: 26.01.2018).
6. Диверсификация ОПК: как побеждать на гражданских рынках / С. Д. Розмирович, Е. В. Манченко, А. Г. Механик, А. В. Лисс; отв. ред. Д. С. Медовников. Новосибирск, 2017. URL: <http://www.instrategy.ru/pdf/367.pdf> (дата обращения: 15.02.2018).
7. Василий Осьмаков: цифровая революция, в отличие от прошлых революций, проходит у нас осознанно. URL: <http://tass.ru/opinions/interviews/4415227> (дата обращения: 15.02.2018).
8. Минпромторг России создает информационную и финансовую инфраструктуру для диверсификации ОПК. URL: http://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#!/minpromtorg_rossii_sozdaet_informacionnuyu_i_finansovuyu_infrastrukturu_dlya_diversifikacii_opk (дата обращения: 15.02.2018).
9. Dehoff K., Dowdy J., Niehaus J. Managing a downturn: How the US defense industry can learn from its past. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/managing-a-downturn> (дата обращения: 15.02.2018).
10. Steinbock D. The Challenges for America's Defense Innovation. URL: <http://www2.itif.org/2014-defenserd.pdf> (дата обращения: 17.11.2017).
11. Matlik J. F. Virtual Validation Institute (VVI) □ An Aerospace Industry Value Proposition // ASME VVI Webinar, 22 November 2016.
12. Augustine N. R. Augustine's Laws. Reston Va.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/4.868832> (дата обращения: 26.01.2018).
13. Bellman K. L. Making DARPA META Goals Come True: How do we Revolutionize Verification and Validation for Complex Systems? URL: https://wiki.sei.cmu.edu/aadl/images/7/72/Bellman_S5_June_10_V7.pdf (дата обращения: 01.02.2018).
14. Shaping the Future of Production. URL: <https://www.atkearney.com/web/world-economic-forum/future-of-production> (дата обращения: 02.03.2018).
15. RSPP President Dr. Alexander Shokhin attended the WEF Shaping the Future of Production in Russia Leadership Council Meeting. URL: <http://eng.rspp.ru/news/view/13217> (дата обращения: 02.03.2018).
16. Shaping Future of Production in Russia Working Group Meeting. List of Participants as of 15 November 2017. Geneva, Switzerland, 17 November 2017.
17. Shaping the Future of Production in Russia Working Group Meeting – Pre-Reading Material / World Economic Forum. 2017.
18. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 октября 2017 г. № 1251 «Об утверждении Правил предоставления субсидии из федерального бюджета на оказание государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций и Положения о проведении конкурсного отбора на предоставление грантов на государственную поддержку центров Национальной технологической

инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций». URL: http://www.rvc.ru/nti/centers/resolution_nti.pdf (дата обращения: 11.02.2018).

19. Центр НТИ СПбПУ. URL: <http://fea.ru/article/centrnti-spbpu> (дата обращения: 11.02.2018).

20. Боровков А. И., Рябов Ю. А., Марусева В. М. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. М.: Департамент корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО, 2018.

21. Krouse J. K. What Every Engineer Should Know About Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing: The CAD/CAM Revolution. New York; Basel: Marcel Dekker, 1982.

22. Блехман И. И., Мышкис А. Д., Пановко Я. Г. Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов. Киев: Наукова думка, 1976.

23. Design with Confidence: CIMdata Commentary. January 29, 2015. URL: <https://www.cimdata.com/en/resources/complimentary-reports-research/commentaries/item/3345-design-with-confidence-commentary> (дата обращения: 08.10.2017).

24. INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. URL: <https://reader.paperc.com/books/INCOSE-Systems-Engineering-Handbook/432278/Ac02> (дата обращения: 10.02.2018).

25. Cloutier R. Systems engineering – Ignore it at your own risk. URL: http://www.southalabama.edu/colleges/engineering/dsc-se/blog/16.0523se_ignoreatownrisk.html (дата обращения: 02.02.2018).

26. Компьютерный инжиниринг / А. И. Боровков, С. Ф. Бурдаков, О. И. Клявин, М. П. Мельникова, А. А. Михайлов, А. С. Немов, В. А. Пальмов, Е. Н. Силина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.

27. Бионический дизайн / А. И. Боровков, В. М. Марусева, Ю. А. Рябов, Л. А. Щербина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015.

28. Автомобили премиум-класса, разрабатываемые в рамках национального проекта «Кортеж», получили высший балл по безопасности. URL: <http://fea.ru/news/6426> (дата обращения: 15.02.2018).

29. Мантуров: Машины проекта «Кортеж» будут готовы к инаугурации президента. URL: <https://mir24.tv/news/16290187/manturov-mashiny-proekta-kortezh-budut-gotovy-k-inauguracii-prezidenta> (дата обращения: 15.02.2018).

30. Gartner's 2016 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies Three Key Trends That Organizations Must Track to Gain Competitive Advantage. URL: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3412017> (дата обращения: 18.09.2017).

31. Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017. URL: <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/> (дата обращения: 18.09.2017).

32. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt). URL: http://research3.fit.edu/camid/documents/doc_mgr/1221/Origin%20and%20Types%20of%20the%20Digital%20Twin.pdf (дата обращения: 28.02.2018).

33. Global Horizons. United States Air Force Global Science and Technology Vision. URL:http://www.airforcemag.com/DocumentFile/Documents/2013/GlobalHorizons_062313.pdf (дата обращения: 01.03.2018).
34. Boden B. L. AFRL Digital Thread / Digital Twin. 21 July 2016. URL: <https://community.plm.automation.siemens.com/siemensplm/attachments/siemensplm/Industry-AD-tkb/2/5/Brench%20Bowden%20Digital%20Twin%20Summit%202021%20July%202016%20DIST%20A.pdf> (дата обращения: 01.03.2018).
35. Why Digital Thread? URL: https://www.dodmantech.com/ManTechPrograms/Files/AirForce/Cleared_DT_for_Website.pdf (дата обращения: 01.03.2018).
36. Выписка из Протокола расширенного заседания наблюдательного совета АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов» от 21 июля 2016 г. № 1.
37. Приказ Минпромторга России от 3 июля 2015 г. № 1828 «Об утверждении перечня организаций, включенных в сводный реестр организаций оборонно-промышленного комплекса».
38. Mikhaluk D., Voinov I., Borovkov A. Finite Element Modeling of the Arresting Gear and Simulation of the Aircraft Deck Landing Dynamics // Enoc-2008. 2008. № 1984. С. 5.
39. Михалюк Д., Войнов И., Боровков А. Разработка и применение расчетной схемы работы тормозной машины палубного аэрофинишера // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. Т. 4. С. 61–68.
40. «Пролетарский завод» отгрузил аэрофинишеры для индийского наземного тренировочного комплекса на авиабазе Ханса. URL: <http://fea.ru/news/3289> (дата обращения: 07.02.2018).
41. В Северной Атлантике утонул истребитель Су-33 с авианосца «Адмирал Кузнецов». 5 сентября 2005. URL: <http://www.newsru.com/russia/05sep2005/su33.html> (дата обращения: 02.03.2018).
42. При посадке на авианосец «Адмирал Кузнецов» потерпел крушение Су-33. 5 декабря 2016. URL: <https://eaily.com/ru/news/2016/12/05/pri-posadke-na-avianosec-admiral-kuznecov-poterpel-krushenie-su-33> (дата обращения: 02.03.2018).
43. СМИ: новый суперавианосец ВМС США не справляется с простейшими задачами. 14 февраля 2018. URL: <https://ria.ru/world/20180214/1514592965.html> (дата обращения: 02.03.2018).
44. Представлен проект «Методических рекомендаций по организации цифрового производства на предприятиях ОПК». URL: http://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#!/predstavlen_proekt_metodicheskikh_rekomendaciy_po_organizacii_cifrovogo_proizvodstva_na_predpriyatiyah_opk (дата обращения: 15.02.2018).
45. Карачёв А. А. Методические рекомендации по организации цифрового производства на предприятиях ОПК: презентация на научно-практическом семинаре «Научно-методологические подходы к организации цифрового

производства на предприятиях ОПК», 20 дек. 2017 г. М.: НТЦ
«Информтехника» – филиал ФГУП «НИИСУ», 2017.

Перенесено из «Оборонная техника»- Сборник материалов: 2018, №1