

## ОТРАСЛЕВАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ЭКОНОМИКА

**М. В. Стоянова<sup>1</sup>**

МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)

УДК: 338.22.021.4

### **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СОЗДАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНЖИНИРИНГОВЫХ КОМПАНИЙ**

*В статье рассматриваются основные проблемы, связанные с внедрением систем виртуальной реальности в инженеринговые промышленные компании. Указывается, что в настоящий момент большое внимание во всех отраслях промышленности уделяется цифровизации как производственных, так и смежных процессов. Показано, что традиционные методы цифровизации представляют собой, в первую очередь, электронные способы создания конструкторской документации (computer aided design, CAD), инженерные расчеты в специализированном программном обеспечении (computer aided engineering, CAE), а также средства компьютерного обеспечения производства (computer aided manufacturing, CAM). Данные методы позволяют значительно сократить трудоемкость проектирования и подготовки изделий к изготовлению и, как следствие, снизить себестоимость. Предполагается что следующим логичным шагом к цифровизации современного производства является объединение существующих методов со значительным расширением возможностей визуализации технологических процессов, лежащих в основе производства. Процесс внедрения цифровых систем визуализации требует тщательного осмысления и решения большого количества междисциплинарных задач: от создания математической, физической или цифровой модели самого технологического процесса, до определения ресурсов, необходимых к привлечению с целью внедрения цифровой системы. Таким образом, цель работы состоит в разработке алгоритма создания технологий виртуальной реальности, учитывающего все ключевые аспекты данного процесса, что является сложной и актуальной задачей. В статье разработан алгоритм, в полной мере раскрывающий данный процесс, и показана экономическая эффективность внедрения цифровых систем виртуализации технологических процессов в инженеринговые промышленные компании.*

**Ключевые слова:** инженеринговые компании, цифровизация производства, виртуальная реальность, производство.

---

<sup>1</sup> Стоянова Маргарита Васильевна — к.э.н., заместитель директора МИЦ «Композиты России», МГТУ им. Н. Э. Баумана; e-mail: mstoyanova@bmstu.ru, ORCID: 0000-0002-0181-8715.

Цитировать статью: Стоянова, М. В. (2022). Разработка алгоритма создания технологий виртуальной реальности для решения задач инжиниринговых компаний. *Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика*, (4), 115–137. <https://doi.org/10.38050/01300105202247>.

**M. V. Stoyanova**

Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

JEL: D24, E22, L51

## **DEVELOPING AN ALGORITHM OF VIRTUAL REALITY TECHNOLOGIES TO SOLVE THE TASKS OF ENGINEERING COMPANIES**

*The article discusses the main problems associated with virtual reality systems implementation in engineering industrial companies and indicates that currently great attention in all industries is paid to both production and related processes digitalization. The paper shows that traditional digitalization methods are primarily electronic methods of creating design documentation (computer aided design, CAD), engineering calculations in specialized software (computer aided engineering, CAE), as well as means of computer support for production (computer aided manufacturing, CAM). The study highlights that these methods can significantly reduce the design costs and preparation complexity for manufacturing and, as a result, can reduce the cost. It is assumed that the next logical step towards modern production digitalization is to combine the existing methods with a significant expansion of technological processes visualization possibilities that underlie the production. It is revealed that the process of introducing digital visualization systems requires careful thinking and solving a large number of interdisciplinary problems: from creating a technological process mathematical, physical or digital model, to determining the resources required to be attracted in order to implement a digital system. Thus, the purpose of the work is to develop an algorithm for creating virtual reality technologies that takes into account all the key aspects of this process, which is a complex and urgent task. The article has developed an algorithm that fully reveals this process and shows the economic efficiency of the digital systems implementation for technological processes virtualization in engineering industrial companies.*

**Keywords:** engineering companies, digitalization of production, virtual reality, production.

To cite this document: Stoyanova, M. V. (2022). An algorithm of virtual reality technologies creation development for solving the tasks of the engineering companies. *Moscow University Economic Bulletin*, (4), 115–137. <https://doi.org/10.38050/01300105202247>.

### **Введение**

В настоящее время технологии виртуальной реальности вызывают повышенный интерес во всех отраслях промышленности. В мире наблюда-

ется устойчивый тренд на виртуализацию производственных процессов. Ведущие мировые компании, такие как Ford Motor Company, The Boeing Company, Daimler AG, Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG и др., внедряют новые технологии в различные бизнес-процессы на всем жизненном цикле продукции: от идеи, проектирования, тестирования до производства и утилизации. Существует множество вариантов промышленного применения решений в области интеллектуальной реальности (дополненной, виртуальной, смешанной): от визуализации компонентов прототипа технологии до комплексной разработки интерактивных семинаров для персонала в опасных отраслях промышленности. Виртуальная реальность является довольно новой технологией, однако уже сейчас можно сделать вывод, что она позволяет промышленным компаниям повысить свою конкурентоспособность.

Согласно проведенному анализу, промышленный сегмент в РФ находится в стадии готовности внедрения технологий дополненной, виртуальной, смешанной реальности в свою деятельность. 66% промышленных предприятий в России планируют инвестировать в дополненную реальность (added reality, AR) и виртуальную реальность (virtual reality, VR) в 2022 г. Наиболее перспективными AR-кейсами для внедрения в промышленность отмечены «Цифровые инструкции» и «Удаленный помощник». 25% опрошенных отметили, что дополненная реальность помогает экономить время при подготовке персонала, снижать число ошибок на производстве. Например, эффективность от применения AR-очков относительно бумажной документации возрастает на 103% (TAdviser, 2019).

Если рассматривать VR, то на промышленных предприятиях считают наиболее перспективными обучение сотрудников и проектирование в виртуальном пространстве. Технологии виртуальной реальности активно применяются в сферах, где получение конкретных практических навыков сопряжено с повышенной опасностью (Lee, & Cha, 2019). Так, каждый современный пилот проводит тысячи часов в кабинах специальных симуляторов, в базу данных которых загружен каждый аэропорт мира, куда совершаются регулярные рейсы, а сами симуляторы в точности повторяют интерьер реальных машин (рис. 1). Аналогичным образом тренируются авиадиспетчеры, доводя до автоматизма свои действия, ведь от их действий зависят тысячи человеческих жизней (Boeing, 2021).

Системы виртуальной реальности также активно используются в автомобильной промышленности. Вершиной их развития на сегодняшний день являются симуляторы гоночных автомобилей класса «Формула-1». Подобный симулятор стоимостью в несколько десятков миллионов долларов позволяет не только потренироваться гонщику, но и опробовать технические новинки для самой команды. Симулятор учитывает десятки



*Рис. 1. Симулятор самолета Boeing-737NG  
Источник: (Boeing, 2021).*

факторов, в том числе аэродинамику, динамическое изменение массы, состояние дорожного полотна и покрышек, погоду, ветер и т.д. Чуть более простые симуляторы используются и в гражданском автопроме, в частности, BMW AG (BMW AG, 2020) использует цифровые копии и шлемы виртуальной реальности при оценке эргономичности проектируемых автомобилей (рис. 2).

Эффективность от внедрения AR/VR-технологий отметили такие компании, как «Сибур», Schlumberger и др. В свою очередь, ПАО «Газпром нефть» презентовало дорожную карту внедрения в компании AR/VR до 2025 г. Согласно планам, к 2025 г. обучение в VR по охране труда и промышленной безопасности будет проходить каждый сотрудник компании, что позволит снизить риски на 30%. К 2022 г. с помощью VR планировалось принимать до 90% инженерных моделей, что дало бы сокращение сроков проектирования на 10% и сроков строительства — на 7% (vc.ru, 2019).

Одной из ключевых проблем при изготовлении сложных высокотехнологичных изделий является недостаточно полное понимание внутренней сути технологических процессов, особенно в части влияния физико-химических параметров процесса на получаемые характеристики готового изделия. В частности, такие ситуации возникают в аддитивном производстве и в композитной отрасли, для которых характерна высокая скорость процессов полимеризации и кристаллизации (зачастую это секунды или даже доли секунд) при сверхмалых линейных и пространственных размерах.



Рис. 2. Использование VR при оценке эргономичности интерьера BMW 7-series  
Источник: (BMW AG, 2020).

Таким образом, отчетливо выделяются два фактора, обуславливающие проблему отклонения получаемых параметров конечного изделия от требуемых в техническом задании:

- высокая скорость протекания ключевых процессов;
- уменьшение масштаба локализации процесса до сверхмалых величин (нано- и микрометры).

В результате, несмотря на активное развитие систем автоматизированного проектирования (САПР), CAD/CAE-систем, повышающих точность и надежность расчетов в случае проектирования конструкций из металлов, остается проблема несоответствия расчетных параметров на входе процессов изготовления и требуемых показателей готового изделия на выходе в случае композитного и аддитивного производства.

В качестве параметра на входе выступает конструкторская модель будущего изделия (представленная в виде электронной геометрической трехмерной модели, а также комплекта чертежей и документации в цифровом виде), разработанная в специализированном программном обеспечении САПР и содержащая, по сути, набор математически описанной геометрии, протекающих внутри процессов и физических явлений, а на выходе — готовый продукт, параметры которого зачастую имеют существенные отклонение от заданных в цифровом виде.

Несмотря на постоянное совершенствование систем САПР, все равно остаются слабо формализованные аспекты технологических процессов, приводящие к тому, что выходные параметры любого изделия, процесса, нового материала, могут отличаться. Более того, в современном мире технологических новаций существуют проблемы выбора технологии изготов-

ления изделия из огромного набора технологий сварки, литья, резки, формовки, штамповки и т.д. (Ungerma et al., 2018) Но в итоге, так как любая технология определяет параметры готового изделия, расхождения даже в сотые доли микрона в размерах (например, в силу наличия микрополостей, шероховатостей и т.д.) могут приводить к крайне негативным последствиям снижения качества и надежности изделий (Петров и др., 2012).

Таким образом, для достижения заданных параметров зачастую приходится сделать значительное количество опытных образцов, причем как на этапе разработки опытных изделий, так и при модернизации серийного выпуска продукции. Соответственно, стоимость таких разработок может превышать стоимость итогового изделия в сотни раз, а разработка/модификация изделий требует колоссальных трудозатрат (Lee et al., 2019). Наиболее актуальны эти вопросы при производстве полимерных композиционных материалов, которые по своим свойствам превосходят стандартные решения и без которых невозможно развитие ракетно-космической отрасли, авиации, кораблестроения и прочих высокотехнологических отраслей (Резник, 2013). Снизить общие затраты на проектирование и постановку производства возможно благодаря использованию систем виртуальной реальности.

### **Существующие подходы к цифровизации процессов в промышленных компаниях**

Рассмотрим подробнее существующие системы САПР и их применение в композитном производстве на примере процесса проектирования и изготовления рефлектора зеркальной космической антенны. Данная конструкция должна отвечать противоречивым требованиям минимальной массы и высокой жесткости (Prosuntsov et al., 2016). Первое требование обусловлено стоимостью вывода аппаратов на геостационарную орбиту Земли. Второе требование непосредственно связано с рабочей частотой антенны. Чем выше частота, тем строже требования к точности формы отражающей поверхности. Для конструкций, работающих в V-диапазоне и выше, отклонения формы не должны превышать 0,1 мм. Отклонения могут быть вызваны факторами космического пространства, в первую очередь, тепловым потоком, исходящим от Солнца, равным 1367 Вт/м<sup>2</sup> (среднее значение мощности теплового излучения в течение года). Первое поколение подобных рефлекторов изготавливалось из металла, и в силу высокой теплопроводности материала тепловой поток не оказывал существенного влияния на стабильность размера и формы. При этом весовая эффективность металлических рефлекторов оставляла желать лучшего. Углепластик до 8 раз эффективнее металлов с точки зрения массы, однако у этого материала в 10 раз ниже теплопроводность. Неравномерный нагрев конструкции рефлектора на орбите ведет к возникновению тепловых

деформаций и, как следствие, к потере сигнала. Но существенная выгода в массе конструкции делает использование углепластиковых рефлекторов исключительно выгодным, что приводит и к развитию систем спутниковой связи. Учитывая, что спутниковая связь — единственная коммерческая космическая технология, ее удешевление ведет к развитию рынка (Reznik et al., 2017).

Рассмотрим существующие системы автоматизированного проектирования (САПР), с помощью которых можно решить задачу проектирования рефлектора зеркальной космической антенны из углепластика (рис. 3).

Системная инженерия	Проектирование и подготовка производства	Производство и эксплуатация	Управление ресурсами и активами предприятия
RM	CAD	MES	CRM
T&M	CAE	MRO	EAM
QRRM	IETM	ILS	FRP
CCM	CAM		HRM
	CAPP		MRP
	PDM		ERP
			PPM
			BI
			KM

Рис. 3. САПР, используемые на различных стадиях жизненного цикла композитного изделия

Источник: составлено автором.

На этапе проектирования и подготовки производства особый интерес представляют следующие системы:

- CAD (*computer-aided design*) — проектирование конструкторской документации (чертежей), а также электронных геометрических моделей технических изделий. CAD, в свою очередь, подразделяется на CADD (*computer-aided design and drafting*) и CAGD (*computer-aided geometric design*) — разработка чертежей (рис. 4) и геометрическое моделирование (рис. 5) соответственно. Процесс CAGD и CADD проектирования композитного изделия не отличается от аналогичных процессов для конструкций из традиционных материалов. На рынке представлено большое количество CAD-систем от компаний Autodesk, Dassault Systems, Аскон и др., и выбор соответствующей программы определяется, в первую очередь, стоимостью программного обеспечения и субъективным опытом пользовате-

ля, так как алгоритм и логика проектирования в различных CAD-системах идентичны.

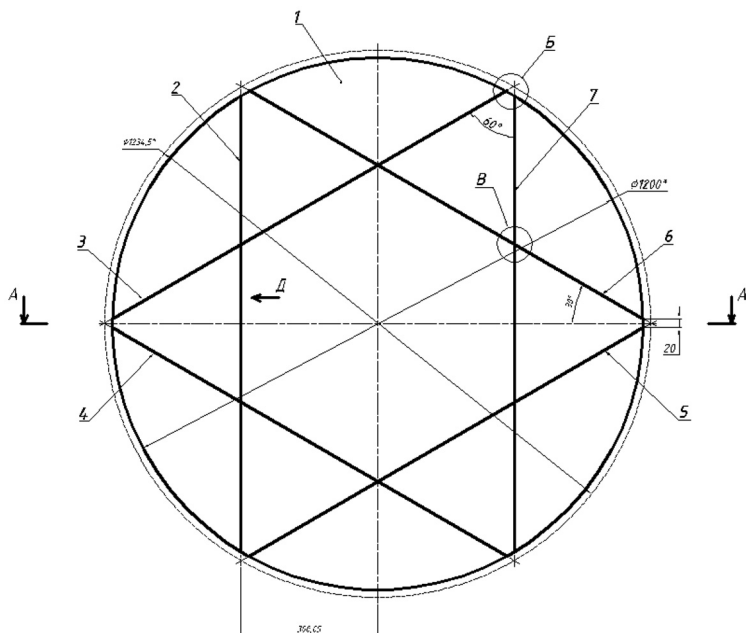


Рис. 4. Чертеж (CADD) рефлектора космической антенны из полимерного композиционного материала  
Источник: (Reznik et al., 2017).



Рис. 5. САГD-модель рефлектора космической антенны из полимерного композиционного материала  
Источник: (Reznik et al., 2017).



- CAE (computer-aided engineering) — системы автоматизации инженерных расчетов (в первую очередь конечно-элементного анализа). Задача CAE — симуляция физических процессов, проверка и оптимизация конструкций. На сегодняшний день существует ряд решений от компаний Siemens PLM Software, ANSYS, MSC Software, SAMTECH и др., позволяющих осуществить конечно-элементный анализ композитных конструкций. Зачастую для полноценного анализа необходимо использовать несколько программных продуктов. Так, при анализе структуры композитов (укладка волокон (рис. 6а), распределение частиц наполнителя (рис. 6б), механические и теплофизические характеристики тканей (рис. 6в), а также композита в целом (рис. 6г)) рационально использовать программное обеспечение (ПО) Digimat компании MSC Software. Кроме того, данное ПО позволяет проводить процесс гомогенизации характеристик для представления их в ортотропной форме. В ПО Digimat рассматривается только представительный элемент (минимальный объем материала, достаточный для анализа исследуемых характеристик) композиционного материала, но не конструкция в целом. Это связано с тем, что в модели представительного элемента может быть несколько сотен тысяч элементов, и моделирование конструкции в целом с волокнами и связующим приведет к невозможности расчета из-за слишком большого количества элементов.

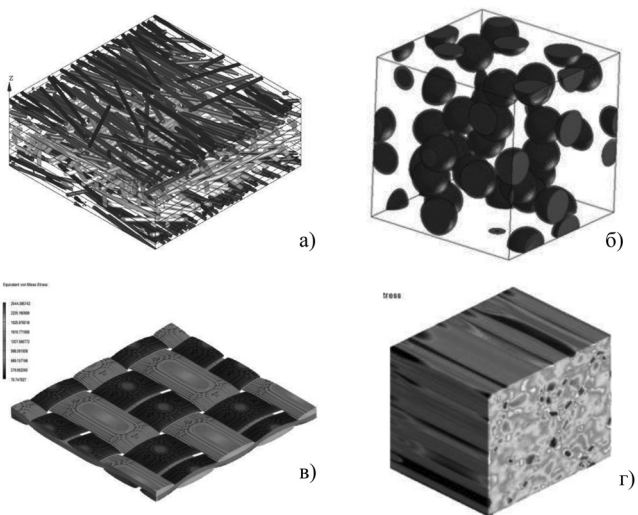


Рис. 6. CAE-проектирование: а) укладки волокон; б) распределения частиц наполнителя; в) механических характеристик ткани; г) теплофизических характеристик волокнистого композита

Источник: (MSC Software, 2022).

Для анализа межслоевых эффектов полимерного композиционного материала (ПКМ) применяют ПО SAMCEF, которое позволяет достаточно точно смоделировать процесс раскрытия трещины, или отслоения элементов представительного элемента композита (рис. 7).

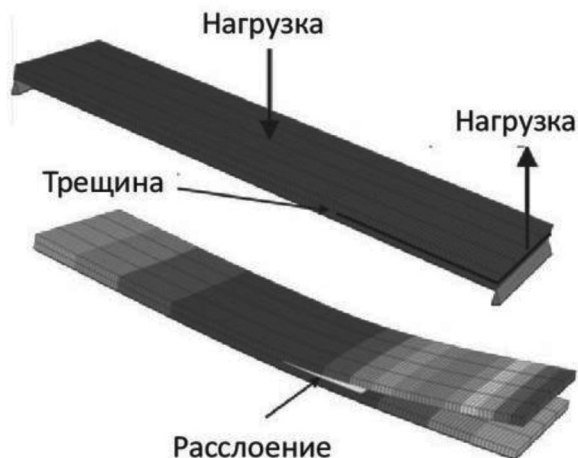


Рис. 7. Моделирование расслоения композитной панели в ПО SAMCEF  
Источник: (Siemens, 2022).

При анализе композитной конструкции в целом применяются иные программные продукты, которые выбираются в зависимости от специфики задач. Один из наиболее распространенных продуктов для анализа конструкций — Siemens NX PLM. Данное ПО используется при решении задач механики и динамики твердых тел, гидро- и газодинамики, охлаждения электронных систем, теплового анализа космических аппаратов, мультифизики и др. При этом большинство из этих задач могут быть решены и в ANSYS, MSC Natran и др. Как было сказано выше, анализ композитной конструкции макроразмера, в которой смоделированы волокна и связующие, невозможен на текущем уровне развития вычислительной техники. Это связано со сложностью конечно-элементной модели (геометрии конструкции, разбитой на определенное количество элементарных геометрических фигур). Размер конечного элемента должен, с одной стороны, обеспечивать наибольшую равномерность сетки (на рис. 8 приведены примеры равномерной и неравномерной сеток), с другой стороны, — адекватное время расчета. Так, при создании конечно-элементной модели с 1 млн элементов время анализа переходного процесса теплопереноса составит несколько недель, а в модели с 10 тыс. элементов время расчета составит 5 часов, при этом результаты будут идентичны (Коваленко, 2014).

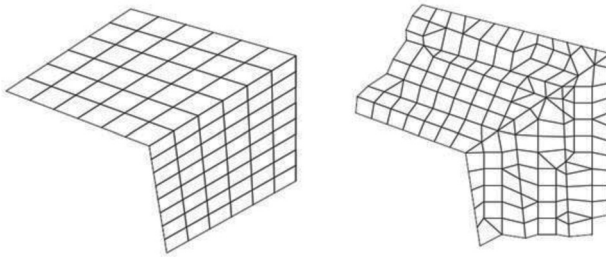


Рис. 8. Равномерная (слева) и неравномерная (справа) конечно-элементные сетки  
 Источник: составлено автором.

В Siemens NX PLM есть встроенный модуль, позволяющий проектировать изделия из ПКМ. Пример орбитального расчета рефлектора космической антенны из полимерного композиционного материала представлен на рис. 9.

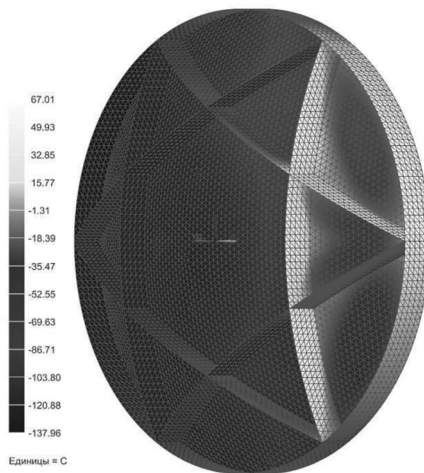


Рис. 9. Распределение температур в конструкции рефлектора космической антенны из полимерного композиционного материала при работе на геостационарной орбите Земли  
 Источник: (Reznik et al., 2017).

Один из дополнительных модулей Siemens NX PLM — FiberSim, является инструментом моделирования укладки слоев в композиционном материале, создания карты раскроя, а также проектирования многослойных систем. Этот инструмент может быть полезен при проектировании композитных конструкций. Данный модуль, в числе прочего, позволяет смоделировать процесс укладки армирующей ткани на криволинейную поверхность изделия (рис. 10).

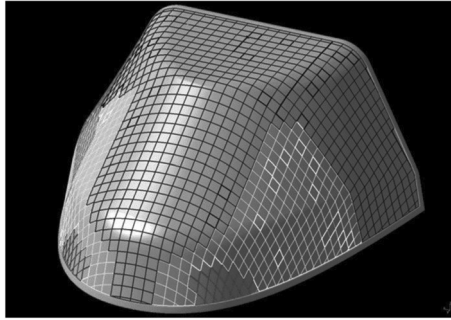


Рис. 10. Модель укладки армирующей ткани на криволинейную поверхность изделия  
Источник: (Siemens PLM, 2022).

- CAM (computer-aided manufacturing) — средства, обеспечивающие автоматизацию программирования и управления производства с использованием числового программного управления или гибких автоматизированных производственных систем. Процесс CAM-проектирования для изделий из композитов и металла не будет отличаться, так как он затрагивает в первую очередь оборудование. Чаще всего под CAM подразумевается проектирование процесса обработки материалов, например, на рис. 11 представлена САМ-симуляция процесса обработки лопатки газотурбинного двигателя на пятикоординатном фрезерном станке с числовым программным обеспечением.
- CAPP (computer-aided process planning) — средства автоматизации планирования технологических процессов. Данный вид САПР находится на стыке CAD- и САМ-систем. CAPP-система позволяет в полной мере описать технологию изготовления: определить последовательность операций, материалы, оборудование, приспособление и инструменты. CAPP-системы для композитных конструкций на сегодняшний день отсутствуют.



Рис. 11. САМ-симуляция процесса обработки детали на пятикоординатном фрезерном станке с числовым программным обеспечением  
Источник: (Siemens PLM, 2021).

В табл. 1 приведено сравнение актуальных средств САПР, в которых доступна работа с композитными конструкциями.

Таблица 1

**Актуальные средства САПР в области композитных конструкций**

Вид САПР	Решаемые задачи
CADD	Разработка чертежной и конструкторской документации
CAGD	Разработка электронных геометрических моделей
CAE	Проведение инженерного анализа и симуляции физических процессов
CAM	Автоматизация программирования и управления систем с ЧПУ
CAPP	Описание технологии изготовления

*Источник:* составлено автором.

Рассматривая отличия в проектировании изделий и конструкций из металлов и ПКМ, стоит отметить, что разработкой металлических изделий могут заниматься никак не связанные друг с другом люди, отделы или организации. Разработанная CAD-геометрия передается для расчета (CAE), затем при подтверждении геометрии она проходит этапы CAPP и CAM, и в каждом случае этапом занимается отдельный человек или команда.

**Алгоритм разработки и внедрения виртуальной реальности в промышленные компании**

Полимерный композиционный материал — сложная многофазная система, которая зависит от большого количества параметров, необходимых к учету со стороны инженера. Другими словами, для композитов справедливо триединство «материал — конструкция — технология», и каждый из трех компонентов влияет на два остальных. На всех этапах проектирования инженер должен проверять и контролировать свой проект, чтобы не было конфликта выбранных материала и конструкции, конструкции и технологии, технологии и материала. Это постоянный итерационный процесс поиска компромисса, который занимает значительную часть времени при проектировании.

Средства САПР позволяют оптимизировать этот процесс, и при наличии CAD и CAE систем, позволяющих работать с композитами, CAPP-системы, заточенные под работу с композитами, отсутствуют как класс. Невозможно на сегодняшний день проверить разработанную геометрию на предмет реализации соответствующей конструкции тем или иным технологическим методом. В отличие от металлов, композиты невозможно отштамповать, отковать, отфрезеровать, выточить, отлить и т.д. Существует ограниченный выбор технологий, каждая из которых требует того или иного набора оборудования и, самое главное, накладывает ограничения на геометрию.

На рис. 12 представлены два варианта конструктивно-силовых схем (КСС) рефлектора космической антенны. Принципиальное отличие этих КСС заключается во внешней отбортовке. В первом случае (рис. 12а) она плоская, во втором «завернута» к основанию параболоида (рис. 12б). Второй вариант является предпочтительным с точки зрения жесткости конструкции, однако трудоемкость и себестоимость изготовления такой конструкции в разы выше (а некоторыми технологическими методами ее и вовсе невозможно изготовить).

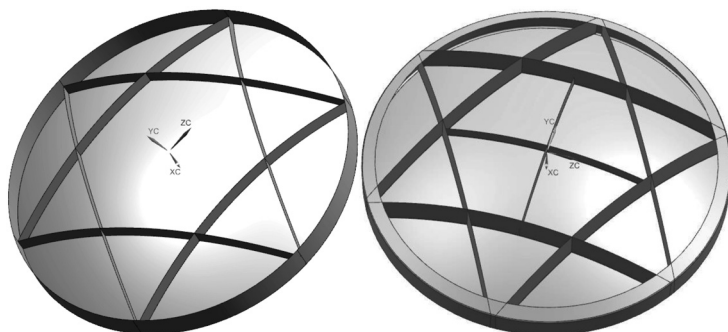


Рис. 12. КСС рефлектора космической антенны с: а) плоской отбортовкой; б) «завернутой» отбортовкой

Источник: (Reznik et al., 2017).

Реализация САРР-системы, которая позволит, загружая трехмерную электронную геометрическую модель (наподобие КСС рефлекторов выше), определить оптимальную технологию производства этого изделия, значительно сократит время разработки и исключит возможность ошибки на этапе разработки геометрии, которая отбрасывает процесс проектирования на недели и месяцы назад в силу описанного выше триединства. В отличие от металлов и пластиков, которые можно отливать, прессовать, штамповать, фрезеровать и т.д., возможности изготовления композитов в значительной степени ограничены.

Определение рациональной конструктивно-компоновочной или силовой схемы композитной конструкции — это всегда поиск компромисса между оптимальной геометрией и технологической возможностью его изготовления. Важно также учитывать объем выпуска композитной конструкции. Один из наименее затратных методов производства — вакуумная инфузия. Данная технология подразумевает наличие только вакуумного насоса со специальной емкостью для улавливания избытков полимерной смолы, но, если стоит задача серийного производства, себестоимость одного изделия возрастает многократно, потому что эта технология полностью ручная. Существуют практически полностью автоматизированные технологии, например, RTM (Resin Transfer Molding), но в этой технологии необходимо приобретать гидравлический пресс (размерами которого будет

ограничены габариты конструкции) и дорогостоящие формообразующие оснастки. Помимо этого, возникает ряд сложностей при работе с сухим армирующим материалом. Для получения композита его необходимо пропитать полимерным связующим, и важно таким образом подобрать точки подачи и выхода связующего (или откачки воздуха, в случае технологии вакуумной инфузии), чтобы не оставалось сухих участков. Данная задача, несмотря на первоначальную простоту, является достаточно нетривиальной, так как механизм течения связующего в армирующем наполнителе отличается от того, как двигалась бы обычная вода, и описывается с помощью закона Дарси и уравнения Навье — Стокса, которые учитывают плотность олигомера, его динамическую вязкость, проницаемость армирующего наполнителя, внешнее давление, ускорение свободного падения (Novikov et al., 2021). Традиционно для определения рационального расположения точек подачи и откачки связующего приходится выполнять ряд опытных пропиток, которые необходимы для каждого нового изделия (так как пропитка зависит от выбранного полимерного связующего, типа армирующего компонента, его ориентации, количества слоев, свойств вспомогательных материалов и геометрии будущего изделия). Все это вызывает дополнительные затраты при проектировании (Novikov et al., 2021).

Задачу оптимизации геометрии можно решить посредством САПР, большинство CAE-систем позволяют это сделать, однако отсутствуют CAEP-систем, позволяющие определить рациональную технологию производства, что значительно замедляет процесс разработки. При этом CAEP-система должна не только отвечать на вопрос, возможно ли изготавливать данную геометрию определенной технологией, но и каким-то образом (например, выделяя красным цветом) указывать, что в предоставленной геометрии вызывает конфликт (данная возможность достаточно просто реализуется путем программной проверки геометрии с заранее указанными критериями для каждой технологии). За счет подобной CAEP-системы можно реализовать процесс итерационного поиска оптимальной геометрии конструкции как с точки зрения прочности/жесткости, так и технологичности.

Перспективным для решения этой задачи выглядит использование технологии виртуальной реальности, так как она позволяет гибко подстраиваться под пользователя и наглядно демонстрировать невозможность изготовления загруженной геометрии тем или иным технологическим методом (например, как уже указано выше, подсвечивая критические элементы геометрии красным цветом), а главное — позволяют сразу же организовывать обучение персонала. Как было указано выше, каждая новая композитная конструкция — это новая технологическая задача, и немалая часть затрат уходит на подготовку производства и кадров, и данный этап начинается после окончания проектирования, что увеличивает срок внедрения нового изделия. Виртуальная реальность позволит в автоматическом режиме готовить технологические инструкции и организовать практическое обучение персонала параллельно с проектированием, так, чтобы по его оконча-

нии персонал уже был готов к производству нового изделия. Традиционно при внедрении нового изделия процесс постановки производства происходит после окончания цикла проектирования, изготавливается опытная партия, затем идет подготовка к серийному производству. На этом этапе происходит обучение персонала. Используя системы VR, можно начать обучение еще до выпуска опытной партии, когда окончательно будет сформирована конструкторская документация, сокращая, таким образом, время выхода изделия на рынок и, как следствие, издержки. Особенно актуален такой подход при внедрении в производство композитных конструкций, так как не существует единых подходов к производству композитов, и каждое новое изделие — это новая технологическая задача, требующая обучения персонала. Кроме того, все больше технологических компаний внедряют ПКМ в свои конструкции и изделия, и переход на принципиально новый материал требует принципиально новых компетенций от кадров. Применение VR позволяет начать процесс обучения основам композитных технологий еще на этапе проектирования конструкции таким образом, чтобы к моменту передачи информации на производство персонал уже понимал, как изготовить ту или иную конструкцию. Еще один важный аспект — сокращение расходов предприятия при обучении персонала и производстве. Обучаясь в виртуальной реальности, технолог может довести свои действия до автоматизма, а совершенные там ошибки не приведут к издержкам.

Таким образом, на рис. 13 представлена принципиальная схема разработки CAPP-системы с использованием технологий виртуальной реальности на примере оптимизации укладки армирующих слоев композитного изделия. Такая система позволит значительно сократить затраты при проектировании изделий из ПКМ.

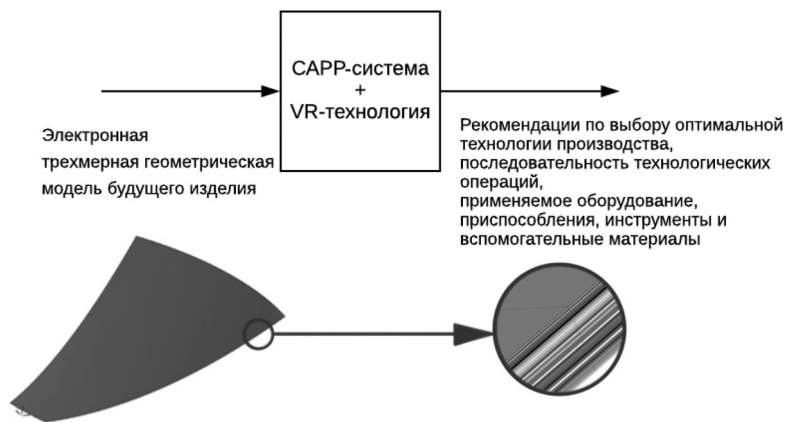


Рис. 13. Принципиальная схема системы проектирования технологии производства изделий полимерных композиционных материалов

Источник: составлено автором.



При этом при изготовлении продукта имеется возможность контролировать и отслеживать часть параметров (визуально: видео-, фотоматериалы процесса изготовления, передавать данные с внешних датчиков: температура, влажность, вибрации, неразрушающий контроль на важных процессах: рентгенография и т.д.). Необходимо изучение и управление процессами проектирования и изготовления изделий из различных материалов с применением цифровых технологий (в том числе виртуальной реальности). Все это создает предпосылки для визуализации производственных процессов, что позволит в конечном итоге снизить объем выпуска дефектных деталей, ускорит время выхода изделия на рынок при сокращении затрат.

Очень важной частью современной промышленности являются инжиниринговые промышленные компании (ИПК). Благодаря гибкости своих подразделений такие компании имеют возможность самостоятельно проектировать, верифицировать и внедрять различные продукты и технические решения (Мадуев, & Зеленский, 2012). Классические предприятия сконцентрированы либо на производстве, либо на проектно-конструкторской деятельности. Существуют ряд крупных компаний (а также R&D-отделы крупных компаний), которые в своей деятельности сочетают перечисленные выше процессы и реализуют технические сложные проекты в нефтегазовой отрасли и машиностроении, однако они в своей деятельности так или иначе вынуждены обращаться к ИПК, которые, в свою очередь, объединяют такие направления, как проектирование, производство и экономическую деятельность, и в условиях быстро меняющейся экономической среды они быстрее ориентируются на новые направления и технологии (Мантуров, 2013).

В современных условиях возрастает роль нематериальных активов в оценке той или иной компании (Беликова, 2017). Несмотря на то, что исследованием нематериальных активов занималось и занимается большое количество отечественных и зарубежных ученых. Все исследователи включают в это понятие факторы, которые могут принести прибыль в будущем, и не привязаны к чему-то физическому (Гаранина, 2009). Сравнивая нематериальные активы крупных, классических предприятий и ИПК, очевидно, что фактор товарного знака и деловой репутации классических компаний будет выше, однако, на стороне ИПК оказываются гибкость стратегии, возможность использования самых передовых технологий, инвестиционная привлекательность. Таким образом, за счет обширного опыта, навыков и знаний в одной, конкретной области стоимость их нематериальных активов выше (Асканова, & Карпенко, 2010).

При реализации проектов перед любой инжиниринговой компанией стоит выбор: реализовывать разработку собственными силами или передавать разработки сторонним компаниям (Соловьев, 2014). Если говорить о визуализации производственных процессов, то в большинстве случаев

передача процесса разработки сторонним компаниям оказывается нецелесообразной, так как это подразумевает глубокое понимание предметной области процесса, знание специфики деятельности предприятия (Stehel et al., 2019). Поэтому целесообразно самостоятельно разрабатывать технологии виртуализации, для чего нужен соответствующий алгоритм.

Несомненно, для любой разработки необходимо техническое задание (ТЗ), однако создание исчерпывающего ТЗ, описывающего все возможные сценарии и требования, либо невозможно, либо трудозатраты на создание такого документа будут в разы превышать трудозатраты на сам процесс разработки. Именно поэтому необходимо создание собственной команды, которая участвует в процессе разработки и в которую будут входить не только программисты, но также специалисты различных областей: бизнес-аналитики, технологи, проектировщики, сотрудники, ответственные за формализацию бизнес-процессов компании, создание базы знаний, обучение персонала. Создание междисциплинарных команд обеспечивает трансфер накопленных знаний от одних участников к другим, таким образом обеспечивается не только обмен существующими знаниями и компетенциями, но также создание новых уникальных компетенций на стыке технологий (Korenkova et al., 2019).

На рис. 14 представлен ранее не публиковавшийся алгоритм создания технологий виртуальной реальности для решения задач инжиниринговых компаний, подразумевающий работу междисциплинарной команды. Первый этап — это сбор данных и создание банка технологических процессов от внутренних заказчиков инжиниринговых компаний (блок 1). Следующий шаг (блок 2) — это выбор конкретного процесса технологической цепочки, нуждающегося в виртуализации. Если взять за пример композитное производство (как наименее оцифрованное и наименее автоматизированное), то выбирать следует тот процесс, ошибка в котором окажет наибольшее влияние на характеристики конечного продукта. Третий блок алгоритма — это создание команды специалистов, которые четко сформулируют и опишут все, что должен включать виртуализированный технологический процесс с точки зрения визуального отображения, интерактивных возможностей и технических тонкостей (блок 4). После этого строится модель технологического процесса (блок 5). Модель может быть математической, физической, компьютерной, имитационной и т.д. На основании этой модели принимается решение, возможно ли с технической точки зрения виртуализировать технологический процесс, или нет (блок 6). Если невозможно, то команда возвращается на этап постановки и формализации задачи и корректирует требования. Если возможно, то команда разрабатывает ТЗ (блок 7) и определяет, какие затраты времени, труда и финансов необходимы для реализации проекта (блок 8). Если виртуализация процесса экономически невыгодна (например, стоимость разработки значительно превышает стоимость обучения персонала), то следует

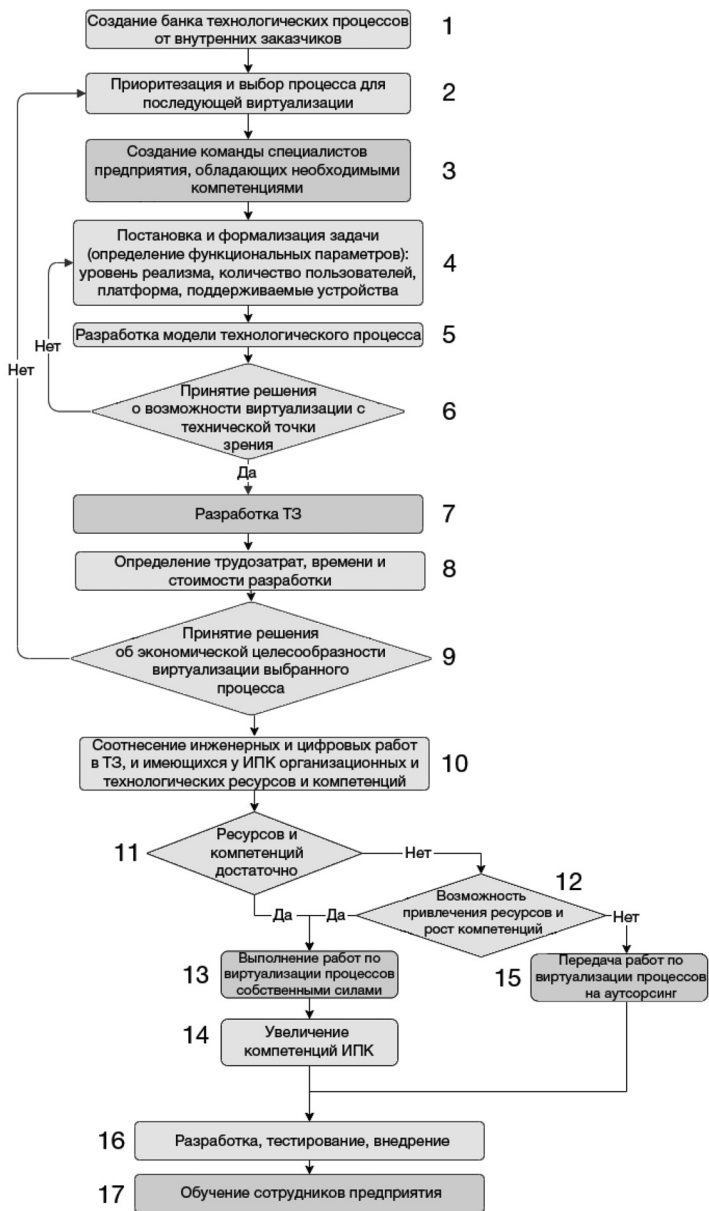


Рис. 14. Алгоритм создания технологий виртуальной реальности для решения задач инжиниринговых компаний

Источник: составлено автором.

изменить приоритеты или процесс для виртуализации (блок 9). Если технология экономически целесообразна, то происходит разделение технологии виртуализации на инженерные и цифровые работы (блок 10) и анализируются ресурсы ИПК (блок 11). Реализация подобных проектов собственными (блок 13) силами позволит создать собственные уникальные цифровые компетенции ИПК (блок 14), что позволит укрепить позиции ИПК на российском и мировых рынках. Если текущих ресурсов недостаточно, то можно их привлечь, либо отдать работы на аутсорсинг (блок 15). По окончании организационных мероприятий начинаются непосредственно разработка, тестирование и внедрение виртуализированного технологического процесса (блок 16), и переход к обучению с его помощью сотрудников предприятия (блок 17).

Стоит также отметить, что, внедряя новое изделие в производственный процесс того или иного предприятия, ИПК берут на себя ответственность за обучение персонала. Как было сказано выше, системы виртуальной реальности в значительной степени оптимизируют этот процесс, особенно учитывая, что крупные производства, обращаясь к ИПК, не обладают собственными компетенциями, иначе они выполнили бы эту задачу своими силами.

Таким образом, за счет накопления и усиления собственных компетенций, создания базы знаний, включающей 3D-модели, алгоритмы, блоки программного кода, реализация каждого следующего проекта по виртуализации технического процесса позволит обеспечить более высокое качество и уровень детализации при ограничении на имеющиеся ресурсы.

## **Заключение**

Современное производство в значительной степени оцифровано, что экономит ресурсы и увеличивает производительность, однако оно практически не виртуализировано. Цифровая визуализация технологических процессов в соответствии с разработанным алгоритмом позволяет достичь положительного экономического эффекта, так как в этом случае не только выполняется работа непосредственно по виртуализации технологий, но и появляется возможность развития компетенций ИПК, что в свою очередь повышает конкурентоспособность организации и открывает для компании новые ниши и рынки (Stoyanova et al., 2021). Разработан алгоритм создания технологий виртуальной реальности для решения задач инжиниринговых компаний, который позволяет внедрить цифровые технологии в инжиниринговую деятельность, либо используя собственные компетенции, либо отдавая данную работу на аутсорсинг.

## Список литературы

Асканова, О. В., & Карпенко, А. В. (2010). Эволюция подходов к осознанию сущности понятия стоимости бизнеса и ее оценки. *Общество: политика, экономика, право*, 2, 38–42.

Беликова, Е. Р. (2017). Роль и место нематериальных активов в создании ценности организаций. *Экономика и предпринимательство*, 1(78), 1149–1155.

Гаранина, Т. А. (2009). Роль нематериальных активов в создании ценности компании: теоретические и практические аспекты. *Корпоративные финансы*, 4(12), 79–96.

Коваленко, Н. А. (2014). Численно-экспериментальное исследование прочности элементов конструкций из слоистых углепластиков. *Обработка металлов*, 1(62), 69–75.

Мадуев, А. С., & Зеленский, П. С. (2012). Современный инжиниринг в проектах и его преимущества. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2(8), 106–107.

Мантуров, Д. В. (2013). Развитие инжиниринга — важнейшая составляющая формирования инновационной экономики в России. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*, 2(91), 3–17.

Петров, В. М., Белецкий, Е. Н., & Безпальчук, С. Н. (2012). Учет физико-механических характеристик композиционных углепластиков, влияющих на процессы разрушения при реализации технологического процесса механической обработки и экстремальных условиях эксплуатации. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала Макарова*, 2, 66–73.

Резник, С. В. (2013). Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических композитных конструкций. *Инженерный журнал: Наука и инновации*, 3(15), 16.

Соловьев, В. И. (2014). Инновации и инвестиции в бизнес-процессах и предпринимательской деятельности. *Инновации в жизнь*, 4(11), 29–42.

BMW AG (2020, November 18). *A new take on vehicle development*. Retrieved July, 19, 2022, from <https://www.bmw.com/en/events/nextgen/global-collaboration.html>.

Boeing (2021). *Simulator Solutions*. Retrieved July, 19, 2022, from <https://services.boeing.com/training-solutions/simulator-solutions>.

Global ranking. *Largest automakers by market capitalization*. Retrieved July, 19, 2022, from <https://companiesmarketcap.com/automakers/largest-automakers-by-market-cap/>.

Korenkova V., Zavadsky, J., & Lis, M. (2019). Linking a performance management system and competencies: Qualitative research. *Eng. Manag. Prod. Serv.*, 11, 51–67.

Lee, H., & Cha, W. C. (2019). Virtual Reality-Based Ergonomic Modeling and Evaluation Framework for Nuclear Power Plant Operation and Control. *Sustainability*, 11, 26–30.

Lee, J., Suh, T., Roy, D., & Baucus, M. (2019). Emerging Technology and Business Model Innovation: The Case of Artificial Intelligence. *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex*, 5, 44.

MSC Software. (2022). *LMS Samcef*. Retrieved July, 19, 2022, from <http://www.mscsoftware.ru/products/digimat>.

Novikov, A. D., Ignatov, P. I., Lubyanskiy, A. O., & Morozov, S. A. (1990). Study of the winding methods influence on the aramid fibers impregnation degree for high-pressure pipes manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series*, (1).

Novikov, A. D., Lubyanskiy, A. O., & Ignatov, P. I. (2021). Developing of the autoclave-free composite manufacturing technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 934(1).

Prosuntsov, P. V., Reznik, S. V., Mikhailovsky, K. V., Novikov, A. D., & Aung, Z. Y. (2016). Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 153(1).

Reznik, S. V., Prosuntsov, P. V., & Novikov, A. D. (2017). Comparison of space antennas mirror reflectors parameters made of composite materials. *MATEC Web of Conferences*, 110.

Siemens. (2022). *Digimat*. Retrieved February, 20, 2022, from [https://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/Images/Siemens-PLM-LMS-Samtech-Samcef-Mecano-br\\_tcm1023-222923.pdf](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/Siemens-PLM-LMS-Samtech-Samcef-Mecano-br_tcm1023-222923.pdf).

Siemens PLM. (2021). *CAM Software*. Retrieved February, 20, 2022, from <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/manufacturing-planning/cam-software.html>

Siemens PLM. (2022). *Fibersim*. Retrieved February, 20, 2022, from <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/fibersim.html>.

Stehel, V., Vochozka, M., Kliestik, T., & Bakes, V. (2019). Economic analysis of implementing VMI model using game theory. *Oeconomia Copernic*, 10, 253–272.

Stoyanova, M. V., Novikov, A. D., Morozov, S. A., & Brom, A. E. (2021). Digital material science for industrial companies. *Journal of Physics: Conference Series*, (1).

TAdviser (2019, 14 июня). *Рынок промышленных VR/AR-решений в России. Исследование*. *TAdviser*. Retrieved July, 19, 2022, from [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Рынок\\_промышленных\\_VR%2FAR-решений\\_в\\_России\\_%28исследование\\_TAdviser%29](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Рынок_промышленных_VR%2FAR-решений_в_России_%28исследование_TAdviser%29).

Ungerma, O., Dedkova, J., & Gurinova, K. (2018). The impact of marketing innovation on the competitiveness of enterprises in the context of industry 4.0. *J. Compet*, 10, 132–148.

vc.ru (2019, 26 декабря). *Тренды AR/VR для бизнеса на 2020 год. Инсайты с форума AVRA Days и конференции Mediana*. Retrieved July, 19, 2022, from <https://vc.ru/future/99309-trendy-ar-vr-dlya-biznesa-na-2020-god-insayty-s-foruma-avra-days-i-konferencii-mediana>

## References

Askanova, O. V., & Karpenko, A. V. (2010). The approaches evolution to understanding business value and its assessment concept essence. *Society: Politics, Economics, Law*, 2, 38–42.

Belikova, E. R. (2017). The role and place of intangible assets in creating the value of organizations. *Economy and entrepreneurship*, 1(78), 1149–1155.

Garanina, T. A. (2009). The role of intangible assets in creating company value: theoretical and practical aspects. *Journal of Corporate Finance Research*, 4(12), 79–96.

Kovalenko, N. A. (2014). Structural elements made of laminated carbon fiber strength numerical-experimental study. *Obrabotka metallov*, 1(62), 69–75.

Maduev, A. S., & Zelensky, P. S. (2012). Modern engineering in projects and its advantages. *Actual problems of aviation and astronautics*, 2(8), 106–107.

Manturov, D. V. (2013). The engineering development is the most important component of the innovative economy formation in Russia. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series “Mechanical Engineering”*, 2(91), 3–17.

Petrov, V. M., Beletsky, E. N., & Bezpalcuk, S. N. (2012). Accounting for the composite carbon plastics physical and mechanical characteristics that affect the destruction processes during the technological process implementation of mechanical processing and extreme operating conditions. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2, 66–73.

Reznik, S. V. (2013). Actual problems of space-rocket composite structures design, production and testing. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 3(15), 16.

Soloviev, V. I. (2014). Innovation and investment in business processes and entrepreneurship. *Innovation to life*, 4(11), 29–42.

TAdviser. (2019, 14 June). *Market of industrial VR/AR solutions in Russia. TAdviser research*. Retrieved July, 19, 2022, from [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Рынок\\_промышленных\\_VR%2FAR-решений\\_в\\_России\\_%28исследование\\_TAdviser%29..](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Рынок_промышленных_VR%2FAR-решений_в_России_%28исследование_TAdviser%29..)

vc.ru (2019, 26 December). *AR/VR business trends for 2020. Insights from the AVRA Days forum and the Mediana conference*. Retrieved July, 19, 2022, from <https://vc.ru/future/99309-trendy-ar-vr-dlya-biznesa-na-2020-god-insayty-s-foruma-avra-days-i-konferencii-mediana>.