



# Аддитивное производство и дополненная реальность как новые производственные технологии в авиационной отрасли

М.Г. Евтодьева

Национальный исследовательский институт мировой экономики и международных отношений имени Е.М. Примакова РАН

Облик мировой авиационной отрасли в настоящее время сильно меняется под влиянием высокой динамики рынков военных и гражданских самолётов, космической техники, беспилотной техники и авиадвигателей. Неуклонно повышаются доходы авиастроительных компаний в сегменте рынка, связанного с ремонтом, послепродажным обслуживанием и другими сервисными услугами. Большой спрос и масштабные инвестиции обеспечивают благоприятные условия для развития новых производственных технологий, таких как аддитивное производство (АП) и дополненная реальность (ДР). Первые исследования и разработки этих технологий начались ещё в 1980-е гг., но широко применять в производстве авиатехники их начали лишь в последнее время. Хорошие перспективы использования технологий АП и ДР открываются в сферах ремонта и технического обслуживания авиалайнеров, а также обучения персонала.

В данной работе на примере крупнейших корпораций авиационной отрасли рассмотрена современная практика применения технологий аддитивного производства и дополненной реальности, определены их формы и степень развития. Сделаны выводы о том, что эти технологии используются практически на всех стадиях производственного и рыночного процессов, и что имеются хорошие перспективы для дальнейшего роста сегментов рынков продукции АП и ДР в авиационном секторе. С точки зрения динамики технологического развития, в отрасли завершился этап становления технологий АП и ДР и начался период их активного роста.

О таком состоявшемся переходе свидетельствуют сразу несколько факторов. Прежде всего, создание доминирующих технологических конструкций на основе АП и ДР, многие из которых уже сертифицированы, и начало серийного производства многих компонентов и платформ с использованием этих технологий. Переформатирование цепочек добавленной стоимости крупнейших авиапроизводителей, развитие государственно-частных партнёрств, формирование альянсов компаний, разрабатывающих и производящих системы и детали для самолётов на основе АП и ДР, также указывают на то, что начался новый этап развития этих технологий и рынков.

**Ключевые слова:** авиационная промышленность, рынок авиационной продукции, циклы развития технологий, инновации, новые производственные технологии, Индустрия 4.0, аддитивное производство, дополненная реальность, цепочки поставщиков, *Boeing, Airbus*

УДК: 339.94

Поступила в редакцию: 23.04.2020 г.

Принята к публикации: 03.06.2020 г.

На сегодняшний день во многих странах мира одним из приоритетов технологического прогресса стало развитие новых (передовых) производственных технологий и «передового производства». Под «передовым производством» (*advanced manufacturing*), согласно определению Национальной ассоциации перспективных производственных технологий США, мы понимаем производство, в котором «широко используются компьютерные, высокоточные и информационные компоненты, интегрированные с высокопроизводительной рабочей силой, которое создаёт систему, сочетающую преимущества массового производства, гибко настроенный на необходимый в данный момент объём выпуска и высокую степень кастомизации [создания индивидуализированной продукции в соответствии с потребностями клиента – М.Е.]» (Новые производственные технологии 2015: 8–9). Новые производственные технологии (НПТ) – это комплекс процессов проектирования и изготовления на современном технологическом уровне кастомизированных (индивидуализированных) товаров различной сложности, стоимость которых сопоставима со стоимостью товаров массового производства.

С понятием «передовое производство» тесно связан термин «Индустрия 4.0», широко используемый правительством ФРГ для обозначения стратегического плана развития современной промышленности и технологий, основанного на объединённых в единое информационное пространство промышленного оборудования и информационных систем. В отличие от доминировавших до недавнего времени технологий автоматизации, в основе Индустрии 4.0 лежит внедрение в заводские процессы киберфизических систем<sup>1</sup>, а также объединение этих систем в одну сеть с возможностью связываться друг с другом в режиме реального времени, самонастраиваться под новые виды товаров или запросы потребителей, чтобы повысить эффективность производственных процессов (Sheve 2019).

К настоящему времени нет устоявшейся точки зрения на то, какие виды технологий объединяет понятие НПТ. Сколковский институт науки и технологий (Новые производственные технологии 2015: 10), выделяет следующие сегменты (категории) НПТ: а) новые технологии организации и управления; б) ИТ-системы, обеспечивающие поддержку жизненного цикла продукции (многомерное моделирование, интеллектуальные системы управления производством); в) новое оборудование и технологии для формообразования изделий; г) новое оборудование и технологии для автоматизации производственных процессов; д) передовые (новые) материалы, используемые для новых произ-

<sup>1</sup> Киберфизические системы – это системы, в которых вычислительные элементы взаимодействуют с датчиками, обеспечивающими мониторинг показателей, и с исполнительными элементами, вносящими изменения в киберфизическую среду. Зачастую киберфизические системы ориентированы на управление объектами инфраструктуры. См.: Zanni A. 2015. Cyber-physical systems and smart cities. *IBM Developer*. April 20. URL: <https://developer.ibm.com/articles/ba-cyber-physical-systems-and-smart-cities-iot/> (accessed 12.10.2020).

водственных процессов. Этим сегментам НПТ соответствуют конкретные технологии: интеллектуальное производство, *LEAN*-технологии и облачное производство, относимые к новым технологиям организации; облачные технологии, системы автоматизированного проектирования; дополненная реальность, межмашинное взаимодействие – системы поддержки жизненного цикла продукции; аддитивное производство, лазерная обработка – новое оборудование и технологии формообразования изделий; промышленная робототехника, сенсорные системы – новое оборудование для автоматизации производственных процессов; композиционные материалы – передовые материалы для производственных процессов и т.д.

Вышеупомянутые производственные технологии можно разделить на две подгруппы: *материальные*, или *материально-производственные*, – связанные с новыми материалами и производственными операциями (аддитивное производство, лазерная обработка, композиты и др.) и *информационные*, или *информационно-цифровые*, – связанные с использованием информационно-коммуникационных технологий и с цифровизацией промышленных процессов (облачные технологии, дополненная реальность, *LEAN*-технологии и др.).

Многие из новых производственных технологий давно используются в производстве, т.е. стадия становления этих технологий, начинающаяся с исследований и разработок, фактически уже пройдена. Так, принципы аддитивного производства (АП), впервые предложенные в 1981 г. Муниципальным промышленным и исследовательским институтом Нагои (Япония), внедряются в производственную сферу с начала 1990-х гг. По технологиям дополненной реальности (ДР) или, иначе, комбинированной реальности, первые разработки были осуществлены в 1992 г.: для военной сферы Лабораторией Армстронга ВВС США, а для гражданской сферы – исследовательским подразделением компании *Boeing*, где была разработана система сборочных процедур с применением ДР (Горбунов 2012; Ceruti 2015).

Этап разработок названных технологий (конец 1980-х – начало 1990-х гг.) совпал по времени с переходом крупнейших авиахолдингов на работу в системах автоматизированного проектирования (*CAD* и *CAE*) и производства, которые были дополнены ИТ-платформами, их обеспечивающими (Евтодьева 2018; Cassiolato 2002). Наибольшее распространение получило, в частности, программное обеспечение *Catia*, которое применялось на производстве компаниями *Airbus*, *Sikorsky*, *Embraer* и рядом других. Позже при создании авиационными компаниями центров виртуальной реальности для разработки виртуальных моделей, корректирующих дизайнерские и производственные решения, стало использоваться и другое ПО (Cassiolato 2002).

В последние годы модели и практики применения новых производственных технологий, включая АП и ДР, широко прорабатываются в таких сферах, как проектирование и производство компонентов и сборка конечных изделий, а также в сфере технического обслуживания, ремонта и послепродажного обслужи-

живания военных и гражданских самолётов. Технологии ДР используют также для мониторинга состояния конструкций в полёте и управления полётами.

В настоящем исследовании подробно рассматривается применение технологий аддитивного производства и дополненной реальности крупнейшими концернами и корпорациями авиастроительной отрасли. Цель исследования заключается в выявлении наиболее перспективных областей применения этих технологий и определении степени их развития. Дополнительно сделаны выводы о влиянии технологий АП и ДР на ряд составляющих отраслевой инновационной системы, включая организацию деятельности компаний-производителей и структуру цепочек поставщиков.

### Методология

В основе исследования лежит инновационный системный подход в экономике, включая концепцию отраслевого инновационного анализа (Г. Малерба, Р. Нельсон и др.) и концепцию жизненных циклов инноваций и технологий.

В концепции отраслевого инновационного анализа инновации рассматриваются с точки зрения динамики ключевых компонентов отраслевой инновационной системы: совокупности фирм (компаний) отрасли и взаимосвязей между ними и компаниями близких отраслей (конкурирующие фирмы, цепочки поставщиков и др.); развития системы знаний, компетенций и технологий; динамики спроса; развития регулирующих институтов (Malerba 2002; Nelson 1994; Vertesy 2017; Евтодьева 2018)<sup>2</sup>.

Развитие технологий происходит на основе конкуренции между новыми технологическими решениями, а также между ними и преобладающими технологическими практиками. В итоге на рынке происходит систематический отбор конкурентоспособных технологий и их кумулятивное развитие, т.е. развитие на основе достигнутого ранее прогресса (Nelson 1994).

*Этапы развития технологий*, или жизненные циклы продукции (ЖЦ) (Гумерова 2008; Nelson 1994), согласно инновационному системному подходу в экономике, соотносятся с этапами развития рынков инновационной продукции, а также с развитием фирм (компаний) и их стратегиями на различных стадиях формирования/развития технологий и рынков (Saracyakupoglu 2019; Евтодьева 2018). Технология проходит в своём развитии фазы становления, роста, зрелости и истощения предела развития; от первой ко второй фазе конкурентоспособность продукции и технологии усиливается, а от третьей к четвёртой – падает. Выделяют фазу жизненного цикла, предшествующую становлению технологии, которая характеризуется фокусом на исследованиях, на этой фазе области при-

<sup>2</sup> Регулирующие институты определяют стандарты выпуска продукции, характерные для отрасли финансовые механизмы, при этом оказывая влияние на темпы и масштабы технологических изменений.

менения технологии ещё чётко не определены, либо имеющиеся варианты применения характеризуются низкой эффективностью (Гумерова 2008).

Развитие рынков тоже проходит несколько стадий: сначала формируются первичные уникальные дизайны, проходящие тестирование в рыночных условиях; затем следует быстрый рост, когда из множества версий новой продукции ключевые экономические игроки выделяют и признают конкурентоспособными один-два (до нескольких) доминирующих типов продуктов, или доминирующих технологических дизайнов; стадия зрелости характеризуется наличием стандартизированных дизайнов продукции и расширением продуктовых линеек за счёт продуктовых инноваций; и стадия упадка, начинающаяся с сильного снижения прибыльности вложений, что свидетельствует о достижении предела развития рынка; на этой стадии ключевые игроки уходят на новые рынки.

В соответствии с рыночными циклами и жизненными циклами технологии меняются и стратегии компаний, с ними работающих, и отраслевая структура промышленности (Ceruti 2019; Malerba 2002). В начале ЖЦ спрос на рынке сильно фрагментирован, новыми технологиями занимаются в основном небольшие фирмы. После того как происходит фиксация технологических дизайнов, права на эти технологии закрепляются за крупными игроками, а прочие компании выбывают с рынка или закрепляют за собой небольшие рыночные ниши (Malerba 2002). На этой же стадии, либо на переходе к зрелому рынку его участники активно создают коалиции, благодаря которым увеличиваются вложения в развитие технологии. На этапе зрелости стоимость входа на рынок возрастает, а доминирующие на нём крупные компании получают возможность использовать свои конкурентные преимущества и «эффект масштаба». На этой стадии развития технологий и рынка преобладают в основном не процессные, а аллокационные и продуктовые инновации (Никитин 2011).

В методологическом плане выбор для рассмотрения в рамках авиаотрасли технологий аддитивного производства и дополненной реальности связан с тем, что первая представляет собой пример получившей активное развитие в последние годы материально-производственной технологии, а вторая – столь же активно развивающейся информационно-цифровой технологии.

Гипотеза исследования состоит в том, что АП и ДР (с точки зрения как технологических, так и рыночных процессов) в последние несколько лет перешли в своё развитие от стадии внедрения технологий и формирования рынков в стадию технологического роста и быстрого развития рынков. Активно формируются доминирующие технологические дизайны, расширяется ёмкость рынков, АП и ДР широко внедряются в процессы производства, ремонта и технического обслуживания. Ключевые авиационные концерны и холдинги, включая корпорации Boeing и Airbus, всё энергичнее занимаются развитием этих перспективных технологий, наращивая инвестиции и формируя альянсы.

## Рынок авиационной продукции и роль НПТ в авиасекторе

Современный мировой авиационный рынок является активно развивающимся высокотехнологичным рынком. По прогнозам 2018–2019 гг. крупнейших авиастроительных компаний *Boeing* и *Airbus*, он продолжит расти в ближайшие два десятилетия<sup>3</sup>. Ожидается, что к середине 2030-х гг. пассажиропоток вырастет вдвое, спрос на гражданские самолёты (грузовые и пассажирские) за два предстоящих десятилетия составит около 40 тыс. единиц (в 2019 г. было произведено 1450 единиц самолётов). Спрос на военные самолёты также продолжает увеличиваться<sup>4</sup>.

Мировой рынок авиационной продукции и, шире, мировой аэрокосмический рынок, сложно выстроен, и в силу высокой технологичности продукции этого рынка её разработка и производство традиционно требует от ключевых игроков – крупнейших авиастроительных компаний и корпораций – привлечения передовых производственных технологий. Этот рынок имеет жёсткие барьеры на вхождение новых компаний (Vertesy 2017), а ключевые участники рынка, как правило, являются мировыми лидерами в области технологических разработок и инноваций. Главные сегменты рынка – авиастроение (военное и гражданское), двигателестроение, вертолётостроение, производство беспилотных систем. В отдельный крупный и высокоприбыльный сегмент рынка выделяется рынок сервисного обслуживания авиационной техники.

Ввиду сложности производимой продукции (современный авиалайнер состоит из десятков тысяч деталей и комплектующих) для авиаотрасли характерны сложные, многоуровневые цепочки компаний-поставщиков, состоящие – для производства каждой модели самолёта – из сотен и тысяч поставщиков. Лидирующие в отрасли крупные компании-сборщики конечной продукции – *Boeing*, *Airbus*, *Lockheed Martin*, *Bombardier*, *Embraer* и др. – выполняют функции системных интеграторов, отвечающих за общую организацию производственного процесса, производство ключевых компонентов, финальную сборку и ряд сопровождающих процессов, включая продажи и маркетинг. Это не просто авиапроизводители, а крупные многоотраслевые концерны; наряду с производством и продажей самолётов в своих рыночных нишах (например, *Boeing* и *Airbus* – лидеры продаж дальне- и среднемагистральных пассажирских самолётов, *Embraer* и *Bombardier* – региональных пассажирских самолётов и бизнес-джетов, *Lockheed Martin* и *Northrop Grumman* – военных самолётов) они

<sup>3</sup> Airbus. Global Market Forecast 2019-2038. Cities, Airports & Aircraft. *Airbus*. URL: <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html> (accessed 12.10.2020);

Boeing. Commercial Market Outlook 2019–2038. *Boeing*. URL: <https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/market/commercial-market-outlook/assets/downloads/cmo-sept-2019-report-final.pdf> (accessed 12.10.2020).

<sup>4</sup> Deloitte. 2020 Global Aerospace and Defense Industry Outlook. *Deloitte*. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/manufacturing/articles/global-aerospace-and-defense-industry-outlook.html> (accessed 12.10.2020).

занимаются и другими производственно-технологическими направлениями, например, разработкой и поставкой информационных систем и технологий (*Boeing, General Dynamics* и др.), электроники и авионики (*Thales* и др.), беспилотных летательных аппаратов (*Northrop Grumman* и др.) и рядом других «специализаций».

В общих эксплуатационных расходах на авиатехнику расходы на топливо составляют 33–34%, на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) – 9–10%, на покупку или лизинг авиалайнеров – 10–11% (Saracayakuroglu 2019: 389). Поэтому разработчики и производители авиалайнеров при поиске оптимальных конструкторских решений всегда учитывают вес машины и расход топлива (Vertesy 2017; Евтодьева 2018), изыскивая возможности улучшения системы технического и послепродажного обслуживания. Наряду с ростом спроса на самолёты, в ближайшие десятилетия ожидается и рост рынка ТОиР и сервисного обслуживания авиалайнеров (*Airbus* прогнозирует, что этот рынок в ближайшие 20 лет вырастет до 4,9 трлн долл.)<sup>5</sup>. Исходя из этих прогнозов, крупнейшие авиахолдинги намерены улучшить свои показатели на этом рынке. Так, в 2017 г. доходы *Boeing* от ремонта, послепродажного обслуживания и других сервисных услуг составили около 14,6 млрд долл., в 2018 г. – около 17 млрд долл., а в ближайшие пять лет компания планирует их утроить до 50 млрд долл.<sup>6</sup>.

Роль и значение новых производственных технологий, в частности, АП и ДР, усиливают ожидания существенно снизить себестоимость конечной продукции и в целом общие производственные и эксплуатационные затраты за счёт:

- применения новых материалов в готовых изделиях (например, композитов и компонентов на основе АТ, позволяющих уменьшить вес лайнеров и расход топлива),
- разработки новых моделей и способов организации производства и менеджмента (ИТ-платформы, системы ДР и др.),
- улучшения системы ТОиР.

Сверх того, новые технологии позволяют улучшить технические характеристики, эффективность и технологичность авиатехники, её «инновационность», что также ценится на рынке. Несмотря на то, что опытно-конструкторские разработки в области новых технологий и процессы их внедрения в технологические и производственные процессы требуют больших вложений, они являются востребованными на рынке, поскольку способствуют в конечном счёте снижению общих затрат на производство и обслуживание авиатехники.

Рынки продукции аддитивного производства и виртуальной/дополненной реальности активно растут в последние несколько лет, охватывая целый ряд производственных секторов, в первую очередь аэрокосмический, ИКТ и авто-

<sup>5</sup> Airbus. Global Market Forecast 2019-2038; Deloitte. 2020 Global Aerospace and Defense Industry Outlook.

<sup>6</sup> Сервисные услуги авиакомпаний включают ремонт и техническое обслуживание самолётов, а также анализ данных и обучение пилотов.

мобилестроение. По некоторым прогнозам, в аэрокосмическом секторе рынок аддитивных технологий к 2025 г. вырастет до 3,184 млрд долл. при совокупном среднегодовом темпе роста (CAGR) за 2018–2025 гг. в 20,24%<sup>7</sup>. Собственно авиационный сегмент (производство/обслуживание самолётов и вертолётов) составит 55,6% этого рынка, или около 1,77 млрд долл. к 2025 г. К этой дате рынок виртуальной и дополненной реальности (ВР/ДР) достигнет 1,364 млрд долл. при совокупном среднегодовом темпе роста с 2019 по 2025 гг. приблизительно в 60%<sup>8</sup>. Для сравнения приведём прогноз по автомобилестроению: рынок аддитивной продукции к 2026 г. вырастет до 11,85 млрд долл. против 6,85 млрд долл. в 2018 г.<sup>9</sup>.

### **Аддитивное производство и дополненная реальность: характеристика технологий и сферы использования в авиасекторе**

*Аддитивные технологии* (АТ) производства характеризуются двумя признаками: конечное изделие получается путём добавления дозированных объёмов материала к исходной конфигурации или к подложке («признак аддитивности»); в основе производства лежит цифровая модель изделия (Моргунов 2016). АТ классифицируются по используемому сырью, которое может быть жидким, порошкообразным и твёрдым, или по методам обработки сырья. При работе с жидкими материалами используются методы послойного сплавления полимерной нити (*FDM*<sup>10</sup>) и лазерной стереолитографии (*SLA*), с порошками – лазерного спекания (*SLS*) и электронно-лучевого плавления (*EBM*), с твёрдыми материалами (листами) – моделирования ламинированных объектов (*LOM*) и др. (Аддитивные технологии 2019; Моргунов 2016; Ceruti 2019). Конечной продукцией аддитивного производства являются изделия из металлов (металлических порошков, в первую очередь титана и алюминия) или из полимеров. Как правило, компании специализируются на каком-либо одном типе изделий. Из металлопорошков изготавливают компоненты ряда ключевых систем воздушного судна (двигатели, в том числе форсунки для двигателей, армирующие элементы и др.),

<sup>7</sup> Aerospace Additive Manufacturing Market Research Report – Global Forecast till 2025. September 2019. *Market Research Future*. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/aerospace-additive-manufacturing-market-1551> (accessed 12.10.2020).

<sup>8</sup> Augmented Reality and Virtual Reality (AR/ VR) in Aviation Market Research Report – Global Forecast till 2025. April 2020. *Market Research Future*. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/ar-vr-aviation-market-8565> (accessed 12.10.2020). По прогнозу, совокупный рынок продукции ВР/ДР к 2025 г. достигнет 766 млрд долл. См.: Global Augmented Reality and Virtual Reality Market. *Market Research Future*. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/augmented-reality-virtual-reality-market-6884> (accessed 12.10.2020).

<sup>9</sup> Automotive Additive Manufacturing Market 2020 Produced 7.5% CAGR Value in Demand By 2027. May 14, 2020. *Market Research Future*. URL: <https://www.marketwatch.com/press-release/automotive-additive-manufacturing-market-2020-produced-75-cagr-value-in-demand-by-2027-stratasys-3d-systems-slm-solutions-concept-laser-2020-05-14> (accessed 12.10.2020).

<sup>10</sup> Здесь и далее приводятся общепринятые английские аббревиатуры соответствующих методов аддитивного производства.

а из полимеров (пластика) – в основном детали интерьера лайнера и вспомогательное оборудование.

На основе методов *SLS* или *EBM* из алюминиевых или титановых порошков изготавливают высокопрочные материалы, похожие по свойствам на обработанные или литые металлы. С помощью АТ могут быть произведены сложные детали при очень высокой свободе формования и минимальных отходах. Для авиастроения особенно ценно, что при этом можно получить конструкции с нужными физико-механическими параметрами: небольшой вес, высокая упругость и прочность.

Основные преимущества применения АТ в авиационной отрасли заключаются в существенном сокращении длительности технологической подготовки производства новых изделий и цикла их изготовления, возможности использования принципиально новых конструкторско-технологических решений, что, в конечном счёте, снижает трудоёмкость производства и себестоимость продукции. Благодаря АТ и 3D-принтерам отпадает потребность производить и хранить большое количество запчастей, и это – ещё один способ сократить затраты авиапроизводителей. Гибкость аддитивных технологий позволяет удовлетворять индивидуальные требования потребителей, прежде всего в сферах прототипирования и тестирования, а также в ремонте и техническом обслуживании авиационной техники.

Большую сложность с внедрением изделий, изготовленных с применением АТ, представляет необходимость их сертификации в соответствии со стандартами регулирующих организаций. Для того, чтобы материалы и детали (компоненты), изготовленные на основе АТ, были сертифицированы, они должны соответствовать стандартам Федерального управления гражданской авиации США (*Federal Aviation Administration, FAA*) и/или Европейского агентства авиационной безопасности (*European Aviation Safety Agency, EASA*), в первую очередь документам *FAA FAR 25 (Federal Aviation Regulation)* и *EASA CS-25 (Certification Specifications)*. По этим стандартам для сертификации материалы подвергаются тестированию, а процесс их изготовления должен быть стойким и последовательным, для чего также необходимо пройти соответствующие тесты (Ceruti 2019: 521; Singamneni 2019).

*Дополненная реальность* – это техника компьютерной графики, при использовании которой в реальном времени происходит наложение виртуальных данных, представленных в 3D, на естественное восприятие реальности (Ceruti 2019: 518): сгенерированные на компьютере изображения дополняют изображения реального мира, основанные на компьютерной и цифровой обработке. По определению Рональда Азумы, это техника «интегрирования 3D-виртуальных объектов в 3D-среду в реальном времени» (Azuma 1997). Таким образом, дополненная реальность представляет собой «эволюцию» виртуальной реальности (VR), в которой у пользователя есть либо специальные шлемы с дисплеями на голове, либо он погружён в структуры (системы) автоматической виртуальной

среды (Горбунов 2012). На сегодняшний день технология ДР активно развивается благодаря распространению смартфонов и планшетов.

В системах ДР используются специальные нацеленные на объект прозрачные очки, оборудованные камерой и проекторами, или мобильные устройства, такие как планшеты или смартфоны, где камера применяется для кадрирования внешней среды, а экран – для демонстрации результатов. Виртуальные объекты связаны с реальным миром (производством) таким образом, что при перемещении точки, откуда снимает камера, положение и значения символов по отношению к внешней среде не меняются. Это достигается вычислением позиции камеры по отношению к внешней среде либо с помощью маркеров (они «размечают» объекты, информация по которым известна), либо без них. В последнем случае набор изображений внешней среды хранится в базе данных, и при изменении положения камеры в пространстве происходит сравнение того, что фиксирует камера, с этой базой данных. ДР считается техникой «реального времени»: это означает, что при перемещении точки зрения виртуальные символы меняют положение на видеовыходе. В настоящее время разработаны специальные пакеты программного обеспечения ДР<sup>11</sup>.

Технологии ДР в сочетании с технологиями ВР применяются в таких сферах, как предварительная визуализация для сборки/производства авиатехники, подготовка кадров, создание иллюстрированных каталогов запасных частей, формирование расширенных руководств по производственным процессам и техническому обслуживанию, оптимизация операций и координация деятельности групп сотрудников, занимающихся сложными операциями. В случае сборки/разборки систем инструкции передаются операторам (техникам) через сочетание CAD-моделей (моделей компьютерной поддержки проектирования), рекомендаций по ручному выполнению операций и виртуальных панелей, с помощью которых можно проверять произведённые операции. Кроме того, технологии ДР применяются для удалённого обслуживания самолётов и другой авиатехники; для этого в реальном времени готовится специальная виртуальная анимация, описывающая стандартные процедуры ремонта и технического обслуживания.

Помимо прочего, распространение технологий ДР ограничивают высокие расходы времени и ресурсов на подготовку руководств и анимаций. Формирование анимаций для каждой операции по проектированию и техническому обслуживанию современного авиалайнера, состоящего из тысяч деталей, невозможно; но этого и не требуется. Как правило, крупнейшие авиакорпорации сами определяют те процессы или системы авиалайнера, где применение технологий ДР целесообразно, т.е. где соответствующие данные необходимы удалённым операторам.

<sup>11</sup> Такие, например, как ALVARTM и VuforiaTM (ПО не на основе маркеров) и ARtoolkit (ПО на основе маркеров).

Несмотря на описанные выше ограничения, технологии ДР внедряются всё шире, в т.ч. для повышения эффективности инспекционных проверок лётной готовности, поскольку при этом не только повышается эксплуатационная надёжность техники, но и минимизируются прямые эксплуатационные расходы авиакомпаний.

Области и направления использования в современном авиастроении технологий аддитивного производства и дополненной реальности в обобщённом виде представлены в Табл. 1. Видно, что обе технологии применяются практически на всех стадиях производственных и рыночных процессов.

**Таблица 1. Применение технологий аддитивного производства и дополненной/виртуальной реальности в авиационной отрасли на различных стадиях бизнес-процессов**

*Table 1. Application of additive manufacturing and augmented/virtual reality technologies at various stages of business processes in the aviation industry*

| Бизнес-процессы                                                    | Аддитивное производство                                                                                                                                                                                                                               | Дополненная реальность и виртуальная реальность (ДР/ VR)                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I. Проектирование, опытно-конструкторские разработки               | Изготовление новых материалов, прототипов и тестовых макетов изделий, поиск новых конструкторско-технологических решений (в т.ч. с более низкими производственными и эксплуатационными затратами)                                                     | Корректировка проектирования на основе виртуальных моделей, визуализация проектирования и производства                                                                                 |
| II. Производство/ поставки компонентов                             | Реализация новых конструкторско-технологических решений, ускорение цифровизации производства, передача задач по производству специализированным компаниям-поставщикам, использование опыта АП для сертификации соответствующих материалов/ технологий | Корректировка и визуализация производственных процессов на основе виртуальных и ДР-моделей, обучение персонала, оптимизация операций (создание ДР-«анимаций» и технических руководств) |
| III. Сборка/ продажа конечного изделия                             | Не используется                                                                                                                                                                                                                                       | Корректировка и визуализация процессов сборки, обучение персонала, оптимизация операций (создание ДР-анимаций и технических руководств), демонстрация (изделий, интерьера и др.)       |
| IV. Техническое обслуживание и ремонт/ послепродажное обслуживание | Оптимизация поставок компонентов и запасных частей                                                                                                                                                                                                    | Корректировка и визуализация технических проверок, инспекции лётной готовности самолётов, управление полётами, повышение эксплуатационной надёжности, обучение персонала               |

*Источники:* составлено автором на основе анализа материалов: (Горбунов 2012; Additive Manufacturing 2018; Ceruti 2019; Saracyakupoglu 2019).

### **Опыт применения АТ и ДР крупнейшими авиационными холдингами**

Крупнейшие компании активно применяют *аддитивные технологии* решения производственных и бизнес-задач в авиастроении, двигателестроении, а

также в производстве беспилотных аппаратов и космической техники (в данной работе не рассматривается) с начала 2010-х гг. По суммам реализуемых контрактов на рынке аддитивных технологий для авиаотрасли лидируют: *3D Systems Inc.* (США), *Arcam AB* (Швеция, аффилирована с *GE*), *Concept Laser* (ФРГ, аффилирована с *GE*), *EOS* (ФРГ), *ExOne* (США), *Optomec* (США), *SLM Solution Group* (ФРГ), и *Stratasys* (США)<sup>12</sup>. На этом рынке действует и ряд менее крупных игроков.

В 2014-2016 гг. компания *Airbus* реализовала несколько успешных проектов по изготовлению и установке компонентов из аддитивных материалов (на основе 3D-печати) на A320 и другие самолёты серии *NEO*, а также на новые самолёты A350 XWB (Моргунов 2016; Ceruti 2019). Речь идёт, в частности, об изготовлении немецкой компанией *Concept Laser* нескольких тысяч кронштейнов для A350 XWB<sup>13</sup>, а также о начале изготовления деталей для салонов самолётов в ходе ремонта и обслуживания техники. *Airbus* наладила производство сидений для бортпроводников из аддитивных материалов для компании *Air Transat*. Для самолётов A320 и A350 XWB компании *Airbus* бельгийская *Materialise* изготовила с применением бионического дизайна пластиковые перегородки для салонов; эта продукция прошла контроль со стороны *Airbus* и сертификацию *AESA*<sup>14</sup>.

По данным компании *Boeing* на 2017 г., только в самолётах *Boeing 787* не менее 30 сравнительно небольших деталей изготавливались на основе АТ, а в целом с применением этих технологий были изготовлены более 50 тыс. деталей самолётов и вертолётных производств *Boeing*<sup>15</sup>. Ряд деталей и компонентов для *Boeing* на основе FDM-технологии, после сертификации своих 3D-принтеров и термопластика *ULTEM 9085*, изготавливает американская компания *Stratasys*<sup>16</sup>. Эта же компания серийно производит для *Airbus* ряд лёгких и ненагруженных деталей из пластика (внутренние детали салона, к примеру, крышки для кабелей и др.<sup>17</sup>.

<sup>12</sup> Aerospace Additive Manufacturing Market Research Report - Global Forecast till 2025. September 2019. *Market Research Future*. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/aerospace-additive-manufacturing-market-1551> (accessed 12.10.2020).

<sup>13</sup> Применение аддитивного производства в авиастроении на примере Airbus и Concept Laser. 2014. *3D-Today*. 13.12. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-use-of-additive-manufacturing-in-the-aircraft-industry-for-example/> (accessed 12.10.2020).

<sup>14</sup> Molitch-Hou V. 2018. Airbus to Install First 3D-Printed Components into Aircraft Cabins. *Engineering.com*. April 12. URL: [https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/16785/Airbus-to-Install-First-3D-Printed-Components-into-Aircraft-Cabins.aspx?e\\_src=relart](https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/16785/Airbus-to-Install-First-3D-Printed-Components-into-Aircraft-Cabins.aspx?e_src=relart) (accessed 12.10.2020); <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/materialise-3d-printed-parts-airbus-112015/> (accessed 12.10.2020).

<sup>15</sup> Petch M. 2017. Insights into Additive Manufacturing at Boeing with Leo Christodoulou. February 28. *3D-Printing Industry*. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/insights-additive-manufacturing-boeing-leo-christodoulou-106718/> (accessed 12.10.2020).

<sup>16</sup> DeNisco Raymon A. 2016. Stratasys launches two new 3D printers, partners with Boeing and Ford on applications. *Techrepublic*. August 24. URL: <https://www.techrepublic.com/article/stratasys-launches-two-new-3d-printers-partners-with-boeing-and-ford-on-new-applications/> (accessed 12.10.2020).

<sup>17</sup> Molitch-Hou M. 2017. Airbus Takes on Stratasys 3D Printing for Serial Part Production. *Engineering.com*. July 20. URL: [https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15281/Airbus-Takes-on-Stratasys-3D-Printing-for-Serial-Part-Production.aspx?e\\_src=relart](https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15281/Airbus-Takes-on-Stratasys-3D-Printing-for-Serial-Part-Production.aspx?e_src=relart) (accessed 12.10.2020).

*Airbus* и *Boeing* совместно с компанией *3D Systems Inc.* производят накладки (кожухи) для видеомониторов самолётов, воздуховоды, обтекатели и другие нагруженные детали, в том числе из металлопорошков<sup>18</sup>. Специализируясь на лазерных методах АП (технологии *SLS*), *3D Systems* также изготавливает детали для вертолётов *AH-64D Apache Longbow*, в производстве которых участвует *Boeing*.

*Norsk Titanium* сотрудничает с *Alcoa*, *Boeing* и *Airbus* по технологиям 3D-печати в металлообработке и производстве титановых деталей<sup>19</sup>. В 2015 г. проекты этой компании для авиаотрасли финансировала *RTI International Metals* (позже *RTI* приобрела компания *Alcoa*)<sup>20</sup>.

Производство компонентов на основе аддитивных технологий уже не ограничивается, как ранее, изготовлением простых деталей для салона самолётов и других неосновных (неструктурных) деталей его конструкции. Напротив, есть много примеров использования АТ для производства ключевых систем и компонентов авиалайнеров. Так, в 2016 г. компания *General Electric* на основе разработок лаборатории *Aviation Additive Lean Lab.* запустила промышленное изготовление топливных форсунок двигателей нового поколения *LEAP* для самолётов *Airbus A320 NEO*, *Boeing 737MAX* и *COMAC C919* (Моргунов 2016)<sup>21</sup>. В реализации данного проекта по разработкам и производству деталей двигателей на основе титаново-алюминиевого сплава, помимо аффилированных с *GE* компаний *Avio Aero* и *Arcam* (предоставивших программное обеспечение и станки для производства на основе ЕВМ-технологии), также участвовали *Materialise*, *Boeing* и ряд других компаний<sup>22</sup>. Успех проекта, как и в целом многообещающие перспективы использования АТ в авиаотрасли, побудили *General Electric* приобрести в том же году контрольные пакеты акций крупных производителей АТ-компонентов – *Concept Laser* и *Arcam AB*<sup>23</sup>. Уже в 2017 г. расположенное в Оберне (Алабама) предприятие *General Electric* по аддитивным технологиям выпустило 12 тыс. форсунок для двигателей *LEAP*, а к 2020 г. планировалось нарастить их производство до 50 тыс. единиц<sup>24</sup>.

<sup>18</sup> Boeing finds growing value in Selective Laser Sintering. *3D-Systems*. URL: <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/boeing-sees-growing-value-versatility-sls-system-and-duraform-materials> (accessed 12.10.2020).

<sup>19</sup> Например, для *Boeing* (самолётов *B787*) она производит изготовленные на основе титана детали, поддерживающие пол бортовых кухонь. Making 3D-printed parts for Boeing 787s. 2018. *Aerospace America*. September. URL: <https://aerospaceamerica.aiaa.org/departments/making-3d-printed-parts-for-boeing-787s/> (accessed 12.10.2020).

<sup>20</sup> Norsk Titanium Brings Nordic Metal 3D Printing Stateside. *Engineering.com*.

<sup>21</sup> Проект по двигателям *LEAP* реализуется совместно с французской *Safran* совместным предприятием *GE* и *Safran Aircraft Engines CFM International*. См.: General Electric announces launch of GE Additive. *Additive Manufacturing Today*. URL: <https://additivemanufacturingtoday.com/general-electric-announces-launch-of-ge-additive> (accessed 29.07.2020).

<sup>22</sup> Obermueller J. 2019. How Materialise Software Solutions Helped to Create the World's Largest Jet Engine. *Materialize*. August 8. URL: <https://www.materialise.com/en/blog/how-materialise-software-solutions-helped-to-create-worlds-largest-jet-engine> (accessed 12.10.2020).

<sup>23</sup> GE agrees to purchase controlling shares of Arcam AB. *General Electric*. URL: <https://www.ge.com/additive/press-releases/ge-agrees-purchase-controlling-shares-arcam-ab> (accessed 12.10.2020).

<sup>24</sup> General Electric announces launch of GE Additive. *Additive Manufacturing Today*. URL: <https://additivemanufacturingtoday.com/general-electric-announces-launch-of-ge-additive> (accessed 12.10.2020).

В том же 2016 г. *Airbus* заключила с компанией *Alcoa* соглашение об изготовлении из аддитивных материалов важных элементов конструкции самолётов, таких как части компонентов фюзеляжа и детали для пилонов двигателей<sup>25</sup>. В производстве ряда деталей, включая крепления для вертикальных стабилизаторов самолётов, *Airbus* сотрудничала с *EOS*<sup>26</sup>.

Технологии виртуальной и дополненной реальности, по информации компаний *Boeing* и *Airbus*, используются ими в первую очередь для улучшения сборки самолётов, обслуживания, ремонта или замены компонентов в части систем гражданских самолётов, таких как гидравлическая система, система авионики (авионический отсек), двигатели и пилоны двигателей и других.

В число крупнейших компаний на рынке технологий ВР/ДР в авиасегменте входят: *Google Inc.* (США), *Microsoft Corp.* (США), *IBM Corp.* (США), *Honeywell Int. Corp.* (США), *EON Reality Inc.* (США), *Oculus VR* (США), *Sony* (Япония), *HTC* (Тайвань), *Samsung Group*, *Elbit Systems* (Израиль), *AeroGlass* (США), *Future Vision* (Великобритания)<sup>27</sup>.

*Boeing* использовал технологии ДР, и в частности, очки *Google Glass*, в процессе сборки для подсоединения электропроводки на самолётах, в т.ч. на широкофюзеляжном 787-8 *Freighter* грузовой модификации<sup>28</sup>. Компания разработала и протестировала собственные технологические системы дополненной реальности, предоставляющие инженерам и техникам интерактивные 3D-схемы проводки в режиме реального времени<sup>29</sup>. В итоге время операций сборки с подсоединением проводки сократилось на 25–30%, а погрешности – на 90%<sup>30</sup>. *Boeing* применяет ДР ещё и в маркетинге, для разработки демонстраторов интерьера самолётов. Такой демонстратор широкофюзеляжного лайнера *Boeing 777X* был представлен в январе 2019 г.<sup>31</sup>.

Компания *Lockheed Martin* также активно применяет технологии ДР, в т.ч. при сборке самолётов и в обучении сотрудников сборке и ремонтным операциям. К примеру, время сборки истребителей *F-35* удалось сократить почти на

<sup>25</sup> Wright I. 2016. Airbus to Receive 3D-Printed Fuselage and Engine Pylon Parts from Alcoa. *Engineering.com*. April 19. URL: [https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/11901/Airbus-to-Receive-3D-Printed-Fuselage-and-Engine-Pylon-Parts-from-Alcoa.aspx?e\\_src=relart](https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/11901/Airbus-to-Receive-3D-Printed-Fuselage-and-Engine-Pylon-Parts-from-Alcoa.aspx?e_src=relart) (accessed 12.10.2020).

<sup>26</sup> EOS: additive manufacturing for the A350 XWB. *Equipment-News*. URL: <https://www.equipment-news.com/eos-additive-manufacturing-for-the-a350-xwb/> (accessed 12.10.2020).

<sup>27</sup> Augmented Reality and Virtual Reality (AR VR) in Aviation Market Research Report - Global Forecast till 2025. April 2020. *Market Research Future*. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/ar-vr-aviation-market-8565> (accessed 12.10.2020).

<sup>28</sup> How Brands Like Boeing Use Augmented Reality in Manufacturing. 2018. *Intellectsoft.net*. March 29. URL: <https://www.intellectsoft.net/blog/how-brands-use-augmented-reality-in-manufacturing/> (accessed 12.10.2020).

<sup>29</sup> Ранее техникам приходилось постоянно сверяться с ноутбуками, чтобы убедиться в правильности подсоединения проводов, тогда как гарнитуры ДР позволяют ускорить эту часть процесса сборки путём присоединения к инструктирующим видеопотокам.

<sup>30</sup> Ismail K. 2018. 8 Augmented Reality Companies Changing the Digital Workplace. *CMS Wire*. October 3. URL: <https://www.cmswire.com/digital-workplace/8-augmented-reality-companies-changing-the-digital-workplace/> (accessed 12.10.2020).

<sup>31</sup> Green J. 2019. Boeing Unveils Augmented Reality for New 777X Interior. *Airline Geeks*. January 24. URL: <https://airlinegeeks.com/2019/01/24/boeing-unveils-augmented-reality-for-new-777x-interior/> (accessed 12.10.2020).

30%<sup>32</sup> за счёт использования гарнитур *Microsoft HoLolens* для просмотра голографического изображения деталей самолёта, а также инструкций по их сборке в режиме реального времени.

### Соглашения о сотрудничестве, альянсы, цепочки поставщиков, инвестиции

С налаживанием на основе аддитивных технологий и дополненной реальности разработок и производства широкого ассортимента продукции и началом серийного производства ряда систем и компонентов получили развитие рыночные процессы, характерные для стадии технологического роста и роста рынков: укрепление цепочек добавленной стоимости, заключение между компаниями – разработчиками, производителями и интеграторами – соглашений о сотрудничестве, слияния и поглощения компаний, формирование альянсов и различных моделей государственно-частного партнёрства.

Ключевые технологические дизайны и формы применения технологий АП и ДР в авиаотрасли, а также примеры соглашений о сотрудничестве, альянсов и инвестиций крупных компаний-авиапроизводителей в развитие технологий АП и ДР представлены в Табл. 2.

Примерами сотрудничества по использованию аддитивных технологий в производстве деталей и компонентов систем для самолётов могут служить упомянутые ранее соглашения *Airbus* и *Boeing* с компаниями *3D Systems*, *Stratasys*, *Materialise*, *Norsk Titanium*.

Помимо того, налаживается сотрудничество компаний по ремонту и обслуживанию авиатехники с компаниями, специализирующимися на аддитивных технологиях: ремонт самолётов всё чаще осуществляется с заменой прежних деталей на детали из аддитивных материалов. Например, *Etihad Airways Engineering*, одна из крупнейших в странах Ближнего Востока компаний по ремонту и обслуживанию авиатехники, заключила соглашение о стратегическом партнёрстве с *EOS* – известным поставщиком систем в сфере промышленных АТ. Аналогичное соглашение *Emirates Engineering* заключила с компанией *3D Systems Inc.* (Ceruti 2019).

Авиастроительные холдинги либо открывают собственные подразделения и производственные площадки по аддитивным технологиям, либо укрепляют сотрудничество с крупнейшими производителями аддитивных компонентов, т.е. осваивают новые производственные технологии за счёт развития цепочек добавленной стоимости. У *General Electric* собственное производство на основе АТ размещается в Оберне, при этом компания создала и отдельную компанию, занимающуюся аддитивными технологиями – *General Additive*. Корпорации *Boeing* и *Airbus* модели вертикальной интеграции предпочитают укрепление цепочек поставщиков и заключение с ними соглашений о сотрудничестве. Но и *General Electric*

32 Там же.

успешно применяла такую бизнес-модель, как мы показали выше на примере проекта по двигателям. В 2017 г. у *Boeing*'а объёмы поставок от поставщиков составили не менее 65 млрд долл.: эти данные свидетельствуют о широких возможностях крупнейших авиакорпораций повысить эффективность и прибыльность сетей поставок благодаря использованию новых производственных технологий<sup>33</sup>.

**Таблица 2. АП и ДР в авиационной отрасли: технологические дизайны, соглашения о сотрудничестве, инвестиции**

**Table 2. AM and AR in the aviation industry: technological designs, cooperation agreements, investments**

| Формы развития технологий и рынков/ тип технологии             | Аддитивное производство                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Дополненная реальность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ключевые технологические дизайны                               | Методы: <i>FDM, SLA, SLS, EBM, LOM</i> . Способы производства: изготовление деталей из металлов и из пластика, в т.ч. конструкций из решётчатых структур (на сертифицированных машинах и 3D-принтерах).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Очки (BP-гарнитуры) <i>Google Glass, Oculus Rift, HTC Vive, Samsung Gear VR</i> . Гарнитуры: <i>Microsoft HoloLens</i> . Пакеты ПО: <i>ALVARTM, VuforiaTM, ARtoolkit</i> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Примеры использования технологий и соглашения о сотрудничестве | <i>Boeing – GE</i> : форсунки и другие детали для <i>LEAP</i> -двигателей.<br><i>Airbus – GE</i> : форсунки и другие детали для <i>LEAP</i> -двигателей.<br><i>Airbus – Concept Laser</i> : кронштейны для самолётов.<br><i>Airbus – Materialise</i> : детали для салона самолётов, в т.ч. на основе решётчатых конструкций.<br><i>Boeing – Stratasys</i> : детали из термопластика <i>ULTEM</i> для самолётов.<br><i>Airbus – Stratasys</i> : детали из термопластика <i>ULTEM</i> для самолётов.<br><i>Airbus – Alcoa</i> : титановый фюзеляж и пилоны двигателей.<br><i>Airbus – NTi</i> : детали для <i>A350 XWB</i> , содействие сертификации машин <i>MERKE IV</i> .<br><i>Boeing – NTi</i> : детали для самолётов <i>Boeing</i> , содействие сертификации машин <i>MERKE IV</i> .<br><i>Boeing, Avio Aero, Arcam и Materialise</i> : турбинные лопатки и другие детали для двигателей <i>GE9X</i> . | <i>Boeing</i> : электропроводка на самолётах; демонстратор салона <i>Boeing 777x</i> .<br><i>Airbus</i> : ДР-приложения для проверки качества производства/ сборки систем самолётов и для коррекции проектирования; демонстратор салона <i>A350</i> .<br><i>Lockheed Martin – Microsoft</i> : системы ДР для сборки <i>F-35</i> .<br><i>Boeing – C360 Technologies</i> : ДР-платформы на основе 360-градусного панорамного видео высокой плотности.<br><i>Airbus-Microsoft</i> : системы ДР для ремонта и обслуживания самолётов <i>Airbus</i> . |
| Специализированные подразделения (центры) компаний             | <i>GE Aviation Additive Lean Lab</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Подразделения <i>Boeing</i> по разработкам в сфере ВР/ДР. Инновационный центр <i>Airbus</i> в Гамбурге. Центры виртуальной реальности <i>Airbus</i> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Инвестиции                                                     | Инвестиции от <i>RTI (Alcoa)</i> в <i>NTi</i> . Покупка <i>GE</i> контрольных пакетов акций <i>Concept Laser</i> и <i>Arcam AB</i> и инвестиции в эти компании                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Инвестиции <i>Boeing</i> в <i>C360 Technologies</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

**Сокращения:** GE – General Electric, NTi – Norsk Titanium

**Источники:** составлено автором на основе публикаций в научных изданиях (Горбунов 2012; Ceruti 2019; Saracayakupoglu 2019) и в электронных ресурсах и СМИ.

<sup>33</sup> Petch M. 2017. Insights into Additive Manufacturing at Boeing with Leo Christodoulou. *3D-Printing Industry*. February 28., URL: <https://3dprintingindustry.com/news/insights-additive-manufacturing-boeing-leo-christodoulou-106718/> (accessed 12.10.2020).

Значительное число соглашений о сотрудничестве заключено и в сфере технологий дополненной и виртуальной реальности (на практике разработки и производство систем ДР осуществляются, как правило, совместно с системами ВР). Например, *Boeing* заключила соглашение с растущей американской компанией *C360 Technologies*, которая специализируется на 360-градусном панорамном видео высокой плотности и на предоставлении в реальном времени по запросу пользователя контента для ВР и ДР на нескольких платформах. Сотрудничество позволит *C360 Technologies* ускорить разработку технологических решений и откроет этой компании доступ на новый рынок, а *Boeing* обеспечит возможность использовать новые продукты в авиакосмической сфере, в т.ч. при сборке и ремонте систем самолётов, а также в развитии автономных систем.

*Boeing* сделала шаги и по инвестированию в разрабатываемые различными компаниями платформы ДР. В частности, в августе 2017 г. через своё венчурное подразделение *Boeing HorizonX* корпорация осуществила инвестиции в *C360 Technologies*<sup>34</sup>.

В *Airbus*, а также в её подразделениях *Airbus Helicopters* и *Airbus Defence and Space*, созданы центры виртуальной реальности (*VRrooms*), в которых инженеры занимаются созданием 3D-объектов для проектирования самолётов, а также разрабатывают проекты в сфере дополненной реальности. К примеру, технологии ДР используются для проведения проверок качества производства/сборки ряда систем самолётов<sup>35</sup>. Инновационный центр *Airbus* в Гамбурге разрабатывает в числе прочего 3D-технологии, позволяющие клиентам «пройтись» по виртуальному салону гражданского самолёта и что-то скорректировать в нём: такой демонстратор был сделан, например, для A350.

Корпорация *Airbus* сообщала о формировании межотдельской команды экспертов для тестирования ДР-технологий и гарнитур/шлемов различных производителей. Акцент при этом сделан на перспективах совместных с другими компаниями разработок в этой области.

В ноябре 2015 г. *Airbus* подписала соглашение о партнёрстве в области ДР-технологий с *Microsoft*: компании намеревались совместно тестировать на самолётах *Airbus* использование при ремонте и обслуживании, а также в проектировании и в инспекционных целях созданные *Microsoft* ДР-гарнитур *Microsoft HoloLens*<sup>36</sup>.

<sup>34</sup> Boeing Invests in Video and Augmented/Virtual Reality Leader C360 Technologies. 2017. *Boeing Mediaroom*. August 2. URL: <https://boeing.mediaroom.com/2017-08-02-Boeing-Invests-in-Video-and-Augmented-Virtual-Reality-Leader-C360-Technologies> (accessed 12.10.2020).

<sup>35</sup> Cece B. 2016. *Airbus*. Virtual reality. Eyes wide open. *Airbus*. December 6. URL: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/12/I-Spy-With-My-Little-Eye.html> (accessed 12.10.2020).

<sup>36</sup> В отличие от представленных на рынке ВР-гарнитур (*Oculus Rift*, *HTC Vive*, *Samsung Gear VR* и др.), *HoloLens* не погружает пользователя в мир 3D, а переносит виртуальные объекты в физический мир, заставляя их вести себя как «твёрдые объекты» за счёт расширенного распознавания среды. Это позволяет клиентам «проходить» через реальный самолёт и нажатием клавиш менять проектируемый дизайн, а также осуществлять другие операции. См.: Cece B. 2016. *Airbus*. Virtual reality. Eyes wide open. *Airbus*. December 6. URL: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/12/I-Spy-With-My-Little-Eye.html> (accessed 12.10.2020).

Крупнейшим и весьма результативным альянсом по разработкам в области аддитивных технологий стало сотрудничество *General Electric*, *Materialise*, *Boeing*, *Avio Aero* и *Arcam* в разработках и производстве турбинных лопаток на основе АТ для *LEAP*-двигателей. Яркие примеры слияний и поглощений продемонстрировали приобретение *Alcoa* компании *RTI* в 2015 г.<sup>37</sup>, а также покупка *General Electric* в 2016 г. контрольных пакетов акций (по 75%) крупнейших производителей аддитивных систем немецкой *Concept Laser* и шведской *Arcam AB*.

Активно образуются ассоциации партнёрских компаний, университетов, исследовательских и других организаций, занимающихся аддитивными технологиями и технологиями дополненной реальности. Некоторые из них (как правило, с участием университетов, лабораторий и других исследовательских объединений) получают государственную поддержку и финансирование, т.е. их следует рассматривать как примеры развития государственно-частного партнёрства. В США одним из таких поддерживаемых правительством проектов стал образованный в штате Огайо Американский Национальный инновационный институт по аддитивным технологиям (*NAMII*) с участием 40 компаний, девяти университетов и ряда некоммерческих организаций<sup>38</sup>. Основы для создания таких ассоциаций и альянсов в США были заложены давно: например, военно-промышленная компания *Lockheed Martin* более десяти лет назад начала сотрудничать с Национальной лабораторией в Окридже в разработке деталей для самолётов на основе АТ, а совместно с компанией *Sciaky* уже ряд лет изготавливает с помощью технологии ЕВМ элементы для лонжеронов самолётов *F-35*.

В странах Европейского союза аналогичный процесс создания альянсов и ассоциаций поддерживает Рамочная программа по научным исследованиям и инновациям «*Horizon 2020*», благодаря которой в последние годы реализуется серия проектов, направленных на развитие отдельных аддитивных технологий и рынков аддитивного производства<sup>39</sup>, а также на развитие ДР-технологий. По одному из таких проектов программы *A4BLUE* – «Адаптивная автоматизация сборки изделий»<sup>40</sup> – при участии компаний *Airbus* и *SECA* реализовано несколько значимых исследований в аэрокосмическом секторе<sup>41</sup>.

<sup>37</sup> По информации *Alcoa*, благодаря покупке *RTI* и началу работы в сфере аддитивного производства в 2019 г. доходы *Alcoa*, как ожидается, увеличатся на 1,2 млрд долл., и на 25% вырастет рентабельность компании. См.: *Alcoa Completes Acquisition of RTI International Metals, Growing Multi-Material Aerospace Portfolio*. *News Alcoa*. URL: <https://news.alcoa.com/press-release/alcoa-completes-acquisition-rti-international-metals-growing-multi-material-aerospace> (accessed 12.10.2020).

<sup>38</sup> National Additive Manufacturing Innovation Institute, *NAMII*. Prototype today URL: <http://www.prototype.today.com/departments-of-energy/new-public-private-partnership-to-support-manufacturing-innovation> (accessed 12.10.2020).

<sup>39</sup> Подробнее см. на сайте Рамочной программы ЕС «*Horizon 2020*», раздел «Проекты и их результаты». URL: <https://cordis.europa.eu/projects/en> (accessed 12.10.2020).

<sup>40</sup> Adaptive Automation in Assembly for BLUE collar workers satisfaction in Evolvable context. 2017. Market Analysis Report- Initial version. *A4BLUE- GA № 723828*. September 28. URL: <https://a4blue.eu/wp-content/uploads/sites/15/2016/11/A4BLUE-D7.5-V2.0.pdf> (accessed 12.10.2020).

<sup>41</sup> В частности, *Airbus* отрабатывался сценарий применения технологий ВР и ДР при сборке и ремонте гидравлической системы самолёта *A350*.

Анализ кейсов применения АТ и ДР в авиаотрасли подтверждает, что на нынешней стадии своего развития эти технологии позволяют решать многие значимые производственные и рыночные задачи.

Проведённый нами анализ приводит к выводу, что к настоящему времени этап становления этих технологий завершился и начался период их активного роста.

Во-первых, на это указывает ряд утвердившихся «доминирующих» технологических дизайнов. По виртуальной и дополненной реальности к таким «типовым дизайнам» можно отнести сочетание различных специальных гарнитур с камерами, мобильных устройств с соответствующим программным обеспечением, с подключением (либо без него) к геоинформационным сервисам. Эти системы применяются для сборки/производства, техобслуживания и ремонта, а также обучения управлению самолётами. В случае с АТ доминирующими дизайнами становятся детали/компоненты из металлических (титаново-алюминиевых) порошков либо из полимеров. На рынке закрепляются и типовые машины (станки) для производства этих деталей.

Во-вторых, об этом свидетельствует серийное производство на основе АТ и ДР многих компонентов для авиаотрасли. Тот факт, что ряд авиационных материалов на основе АТ, а также станки, которые их производят (включая 3D-принтеры), прошли сертификацию в *FAA* и *EASA*, также говорит о зрелости аддитивных технологий авиаотрасли. Речь идёт уже не об опытных образцах и демонстрационных проектах, а об апробированных технологиях для конкретных производственных процессов.

В-третьих, расширение объёмов рынков АТ и ВР/ДР и активное включение крупнейших авиапроизводителей в процессы разработок либо заказа продукции на основе АТ и ДР и в формирование соответствующих цепочек поставок деталей и компонентов также подтверждают переход к фазе зрелости технологий и быстрого роста рынка. Об этом же говорит и развитие государственно-частных партнёрств по разработкам и производству в сфере АТ и ДР, а также создание консорциумов и альянсов компаний по разработке и внедрению высокотехнологичной продукции. Это говорит о том, что технологии АТ и ДР широко востребованы рынком, так как позволяют снижать себестоимость продукции и повышать её качество.

Цепочки добавленной стоимости включают всё больше новых, специализирующихся на АТ и ДР игроков – крупных (*Arcam, Stratasys, Microsoft*) и средних (*NTi, Materialise, C360 Technologies*); в эти компании нарастают инвестиции. Это свидетельствует не только о неплохих перспективах развития рынков аддитивных технологий и дополненной реальности, но и о растущей конкуренции на нём, а именно конкуренция является главным фактором развития как самих технологий, так и связанных с ними рынков (Nelson 1994).

Проведённый нами анализ демонстрирует, что технологии аддитивного производства и дополненной реальности уже используются практически на

всех стадиях производственного и рыночного процесса в авиаотрасли. Дальнейшее их внедрение и оптимизация применения на каждой из этих стадий будет стимулировать рост сегментов рынков продукции АП и ДР/ВР в авиационной и, шире, аэрокосмической отрасли. Роль АП, ДР и других новых производственных технологий важна не только для сокращения трудоёмкости и времени производства, улучшения систем технического и послепродажного обслуживания авиационной продукции, но и для оптимизации менеджмента производственных и рыночных процессов за счёт более чётко заданных обратных связей при решении управленческих и технических проблем в режиме, близком к режиму реального времени.

Развитие АП по-прежнему будет сдерживать сложность сертификации продукции и средств производства, увеличивающая длительность циклов производства и поставок, а развитие ДР – трудоёмкость и высокая стоимость создания специальных контентов (техруководств и анимаций) для операций в ключевых областях применения. Тем не менее, активное использование компонентов на основе АТ и систем ВР/ДР в процессах сборки, ремонта и технического обслуживания самолётов даёт основания предположить, что рынки продукции АТ и ДР для авиаотрасли, как и сфера применения этих технологий, будут расширяться.

Оценивая перспективы этих рынков, нельзя не упомянуть о кризисе авиационной отрасли, вызванном пандемией COVID-19, которая с марта 2020 г. привела к сокращению объёмов авиаперевозок. Хотя на момент написания статьи крупнейшие компании не опубликовали своих прогнозов относительно того, как это сокращение повлияет на закупки авиалайнеров, существенное падение спроса сомнений не вызывает. Вопрос лишь в том, насколько оно может быть сильным и длительным. В краткосрочной перспективе следует ожидать снижения темпов производства авиалайнеров, более низкого (нежели прогнозировался) спроса на услуги по их ремонту и обслуживанию и некоторого сокращения инвестиционной базы развития новых производственных технологий в отрасли, включая АП и ДР.

В долгосрочной перспективе, однако, следует ожидать, что АП и ДР, как и другие новые технологии, будут способны и корректировать, и влиять на ситуацию на авиационном рынке, наряду с другими ключевыми рыночными факторами, такими, как колебания спроса или усиление/ослабление конкуренции. Нельзя недооценивать высокий потенциал НПТ, в т.ч. аддитивного производства и дополненной реальности, как средств повышения адаптивности авиационного строения, а также сферы эксплуатации авиатехники. Опыт 2010-х гг. показал, что «на выходе» из мирового кризиса 2008–2009 гг. внимание к прорывным и перспективным технологиям не упало, а напротив, значительно повысилось (Данилин 2018: 257). При этом в целях усиления конкурентоспособности национальных экономик и промышленных отраслей и «придания динамики» инновационному развитию многие страны, включая США и страны ЕС, выработали

масштабные программы поддержки исследований по НПТ. Скорее всего, аналогичная ситуация будет наблюдаться и с технологиями аддитивного производства и дополненной реальности «на выходе» из нынешнего кризисного отрезка в развитии авиационной отрасли. Компании и регуляторы будут поддерживать и укреплять АП и ДР как новые технологии, позволяющие при снижении издержек повысить эффективность производства, а также качество управления производственными и рыночными процессами.

**Об авторе:**

**Марианна Георгиевна Евтодьева** – кандидат политических наук, руководитель группы глобализации военно-экономических процессов Национального исследовательского института мировой экономики и международных отношений имени Е.М. Примакова РАН. Российская Федерация, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 23. E-mail: mariannaevt@imemo.ru

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Received: April 23, 2020

Accepted: June 03, 2020

## Additive Manufacturing and Augmented Reality as New Production Technologies in the Aviation Industry

M.G. Yevtodyeva

[DOI 10.24833/2071-8160-2020-5-74-307-330](https://doi.org/10.24833/2071-8160-2020-5-74-307-330)

Primakov National Research Institute of World Economy and International Relations, Russian Academy of Sciences

**Abstract:** The image of the global aviation industry is dramatically changing. This derives in the first instance from dynamic development of the military and civil aircraft market, where a significant growth in demand and an increase in airliner deliveries over the next 15 years by at least 80% was forecasted. Aircraft manufacturers' revenues in services business, including maintenance, repair and overhaul (MRO) are boosting, too. All this provide favorable conditions for the development of new production technologies in the aviation sector, including Additive Manufacturing (AM) and Augmented Reality (AR). Though the research and development in the field of AM and AR began in the 1980s, only in the last decade AM and AR technologies have reached the necessary level of maturity to be widely used in design, manufacturing and assembly processes in aeronautics, including civil and military aircraft. There are good prospects for their use in aircraft' maintenance, repair and overhaul as well. The transition from the initial period of formation of AM and AR technologies to the stage of technological growth and rapid development of relevant markets is evidenced by a number

of factors. First of all, they include establishment of "dominant" technological designs based on AM and AR (certified additive production methods, new materials based on AM and machines for their production, special Augmented Reality headsets, etc.), as well as beginning of serial production of many AM-components and AR-platforms for the aviation industry. The participation of major aircraft manufacturers such as Boeing and Airbus in AM and AR R&D projects, the formation of "new" supply chains, the development of public-private partnerships (e.g. NAMII in the U.S.), as well as the formation of consortia and alliances of companies that develop and produce systems and parts for aircraft based on additive technologies and augmented reality, are also indicators of the transition to a new stage of development of these technologies and markets.

**Keywords:** aviation industry, aviation market, technology development cycles, innovations, new production technologies, Industry 4.0., additive manufacturing, augmented reality, supply chains, Boeing, Airbus

#### About the author:

**Marianna G. Yevtodyeva** – Candidat of Political Science, Head of the Group of Globalization of the Military-Economic Processes in the Center for International Security, Primakov National Research Institute of World Economy and International Relations, Russian Academy of Sciences (IMEMO), Russian Federation, 117997, Moscow, Profsoyuznaya Str., 23.  
E-mail: mariannaevt@imemo.ru

**Conflict of interest:** The author declares absence of conflict of interests.

#### References:

- Azuma R.T. 1997. A Survey of Augmented Reality. *Presense: Virtual and Augmented Reality*. 6(4). P. 355–385.
- Cassiolato J.E., Bernardes R., Lastres H. 2002. *Transfer of Technology for Successful Integration into the Global Economy: A Case Study of Embraer in Brazil*. UNCTAD and UNDP, New York and Geneva. 64 p.
- Ceruti A., Marzoccab P., Liverania A., Bil C. 2019. Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*. 6(4). P. 516–526.
- Malerba F. 2002. Sectoral Systems of Innovation and Production. *Research Policy*. 31(2). P. 247–264.
- Nelson R.R. 1994. The Co-Evolution of Technology, Industrial Structure, and Supporting Institutions. *Industrial and Corporate Change*. 3(1). P. 47–63.
- Saracyakupoglu T. 2019. The Qualification of the Additively Manufactured Parts in the Aviation Industry. *American Journal of Aerospace Engineering*. 6(1). P. 1–10.
- Sectoral Systems of Innovation and Production in Developing Countries: Actors, Structures and Evolution. 2009. Ed. by F. Malerba and S.Mani. Edward Elgar Publishing Limited. Cheltenham, UK; Northampton, MA, USA. 394 p.
- Singamneni S., Yifan L.V., Hewitt A., Chalk R., Thomas W., Jordison D. 2019. Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*. 8(1). P. 1–13.
- Vertesy D. 2017. Preconditions, Windows of Opportunity and Innovation Strategies: Successive Leadership Changes in the Regional Jet Industry. *Research Policy*. 46(2). P. 388–403.

*Additivnye tehnologii: nastojashhee i budushhee: materialy V mezhdunarodnoj konferencii* [Additive Technologies: Present and Future: Proceedings of the V International Conference] 2019. Moscow: VIAM. 448 p. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1172.pdf> (In Russian).

Gorbunov A.P., Nechaev E.E., Terentsi G. 2012. Dopolnennaya real'nost' v aviatsii [Augmented Reality in Aviation]. *Prikladnaya informatika*. 40(4). P. 67–80 (In Russian).

Gumerova G.I., Shaimieva E.Sh. 2008. K voprosu o kontseptsii zhiznennogo tsikla tekhnologii [On the Issue of the Technology Life Cycle Concept]. *Innovations*. 118(8). P. 71–75 (In Russian).

Danilin I.V. 2018. Razvitie perspektivnykh tekhnologii: vyzovy dlya nauchno-tekhnologicheskoi i innovatsionnoi politiki [Advanced Technologies Development: Challenges for the Science, Technology and Innovation Policies]. *Vestnik MGIMO-Universiteta*. 63(6). P. 255–270 (In Russian).

Isachenko V.A., Astakhov Yu.P., Saushkin B.P. 2016. Tekhnologii raketno-kosmicheskogo mashinostroeniya – problemy i perspektivy [Rocket and Space Engineering Technologies – Problems and Prospects]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. №1. P. 10–14 (In Russian).

Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. 2016. Additivnye tekhnologii dlya aviakosmicheskoi tekhniki [Additive Technologies for Aerospace Engineering]. *Additivnye tekhnologii*. №1. P. 30–38 (In Russian).

Nikitin A.V. 2011. Ponyatie, vidy produktovykh innovatsii i metody otsenki effektivnosti ikh vnedreniya predpriyatiyami [Concept, Types of Product Innovations and Methods of the Assessment of Efficiency of Their Introduction by Enterprises]. *Sotsial'no-ekonomicheskie yavleniya i protsessy (Socio-economic phenomena and processes)*. 34(12). P. 217–221 (In Russian).

*Novye proizvodstvennye tekhnologii: publichnyi analiticheskii doklad*. 2015. [New Production Technologies: Public Analytical Report]. Moscow: Izdatel'skii dom «Delo», RANEPa. 272 p. (In Russian).

Tarasov I.V. 2018. Industriya 4.0: ponyatie, kontseptsii, tendentsii razvitiya [Industry 4.0: Concept & Development]. *Business strategies*. 50(6). P. 57–63 (In Russian).

Sheve G., Khyuzig S., Gumerova G.I., Shaimieva E.Sh. 2019. Ot Industrii 3.0 k Industrii 4.0: osnovnye ponyatiya, izmereniya i komponenty Industrii 4.0 [From Industry 3.0 to Industry 4.0: Key Concepts, Dimensions, and Components of Industry 4.0]. *Investitsii v Rossii*. 296(9). P. 32–40 (In Russian).

Yevtodyeva M.G. 2018. Sravnitel'nyi analiz otraslevykh innovatsionnykh sistem: Rossiya i Braziliya na rynke regional'nykh samoletov [Comparative Analysis of Sectoral Innovation Systems: Russia and Brazil on the Regional Jet Market]. *Vestnik MGIMO-Universiteta*. 60(3). P. 179–197 (In Russian).

Additive Manufacturing. Applications in Aerospace. 2018. *Insight (Journal of the Aerospace Technology Institute)*. №8. P. 1–16. URL: <https://www.ati.org.uk/media/sogpibd0/insight08-additive-manufacturing.pdf>.

### Список литературы на русском языке:

Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы V международной конференции. 2019. ФГУП «ВИАМ». Москва: ВИАМ. 448 с. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1172.pdf>.

Горбунов А.П., Нечаев Е.Е., Теренци Г. 2012. Дополненная реальность в авиации. *Прикладная информатика*. 4(40). С. 67–80.

Гумерова Г.И., Шаймиева Э.Ш. 2008. К вопросу о концепции жизненного цикла технологий. *Инновации*. 8(118). С. 71–75.

Данилин И.В. 2018. Развитие перспективных технологий: вызовы для научно-технологической и инновационной политики. *Вестник МГИМО-Университета*. 6(63). С. 255–270.

Евтодьева М.Г. 2018. Сравнительный анализ отраслевых инновационных систем: Россия и Бразилия на рынке региональных самолетов. *Вестник МГИМО-Университета*. 3(60). С. 179–197.

Исаченко В.А., Астахов Ю.П., Саушкин Б.П. 2016. Технологии ракетно-космического машиностроения – проблемы и перспективы. *Технология машиностроения*. № 1. С. 10–14.

Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. 2016. Аддитивные технологии для авиакосмической техники. *Аддитивные технологии*. №1. С. 30–38.

Никитин А.В. 2011. Понятие, виды продуктовых инноваций и методы оценки эффективности их внедрения предприятиями. *Социально-экономические явления и процессы*. 12(34). С. 217–221.

*Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад*. 2015. Москва: Издательский дом «Дело» РАНХиГС. 272 с.

Тарасов И.В. 2018. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития. *Стратегии бизнеса*. 6(50). С. 57–63.

Шеве Г., Хюзиг С., Гумерова Г.И., Шаймиева Э.Ш. 2019. От Индустрии 3.0 к Индустрии 4.0: основные понятия, измерения и компоненты Индустрии 4.0. *Инвестиции в России*. 9(296). С. 32–40.