

## **Моделирование аэрокосмических производств: обзор технологий, методов и перспектив их использования в производствах будущего**

© А.А. Кабанов

Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет), Москва, 125993, Россия

*Представлен обзор разных современных цифровых технологий, используемых для моделирования производственной деятельности предприятий, прежде всего авиационного и ракетно-космического профиля. Цель работы — выработать подходы к внедрению технологий в практическую деятельность уже сегодня, не дожидаясь окончательного формирования среды их внедрения, для которой в большинстве случаев требуются глубокая подготовка, кардинальные изменения и длительная по времени реализация, без чего их использовать либо в принципе невозможно, либо неэффективно. С этих позиций исследована методическая основа технологий, проведены их систематизация и оценка потенциала для решения производственных задач как текущих, так и перспективных. Показаны основные проблемы, сдерживающие развитие технологий. Уделено внимание усилиям, прилагаемым разработчиками для стандартизации в области цифровой трансформации. Исследованы возможности и ограничения применения представленных технологий в образовательной сфере в целях подготовки востребованных специалистов, знакомых с ними и имеющих навыки их практического использования. При этом технологии условно подразделены на те, которые можно изучать в высших учебных аэрокосмических заведениях, и те технологии, изучение которых целесообразно в рамках программ дополнительного профессионального образования.*

**Ключевые слова:** ракетно-космические производства, цифровые двойники, технологии цифрового моделирования, подготовка специалистов

**Введение.** По оценкам работы [1], среди прочих отраслей промышленности России машиностроение в отношении передовых практик в области цифровизации занимает очень скромные позиции. Еще более консервативными в этом отношении являются авиационная и ракетно-космическая отрасли. При этом это подтверждается и международным опытом. В работе, выполненной немецкими исследователями, на основании анализа публикаций международной реферативной базы данных Scopus установлено, что на 2020 г. (взрывной рост публикаций по сравнению с предыдущими периодами) из более чем 1000 статей по теме «цифровой двойник» на долю авиации пришлось всего 193 публикации [2]. Зачастую это в некоторой степени оправданно, так как для этих отраслей качество изделий имеет принципиальное значение и при любом отступлении от освоенных конструкций, технологии, производства требуется длительная процедура

внедрения изменений. В то же время при кардинальном перестроении процессов предприятий, особенно в наукоемких областях, достаточно высок риск потери текущего потенциала. По этим же причинам где-то с середины 2010-х годов лидеры внедрения цифровых технологий в промышленности — компании Dassault Systemes и Siemens PLM Software — отошли от своей прежней практики предложения универсальных ИТ-решений в сторону последовательной адаптации новых инструментов под объект трансформации.

Оставив без внимания необходимость трансформации в первую очередь производственных и связанных с ними процессов, далее анализируем потенциал технологий, известных под общим собирательным названием «Цифровое производство» с целью выработать подходы к повышению эффективности использования и внедрения современных цифровых технологий на отечественных предприятиях. Для этого были последовательно выполнены обзор и систематизация технологий, выявлены проблемные зоны и даны рекомендации. В качестве объекта исследования было выбрано само аэрокосмическое производство, в качестве предмета — его представление в виде разных моделей, в качестве методов — способы такого представления из арсенала предлагаемых технологий цифрового моделирования.

**Технологии и методы моделирования производства.** Все многообразие технологий разделено на два класса.

1. Технологии, представляющие цифровую модель производства в различных разрезах с последующей манипуляцией ею для получения результатов.

2. Технологии, напрямую не связанные с формализацией предметной области. Именно к этому классу относятся почти все современные технологии Индустрии 4.0, в том числе:

1) технологии, обеспечивающие интеграцию и обмен данными между элементами производственных систем, а также их моделями класса 1:

– технологии IoT (от англ. Industrial Internet of Things — промышленный интернет вещей);

– технологии CPS (от англ. Cyber Physical Systems — киберфизические системы), позволяющие объединить физические и виртуальные процессы, а также связанные с ними машины с людьми);

2) технологии, помогающие реализовать идентификацию физических элементов системы производства:

– машинное зрение;

– радиочастотная идентификация RFID (от англ. Radio Frequency Identification) и др.;

3) технологии, поддерживающие предиктивный анализ состояния производства и элементов его системы, предоставляющей возмож-

ность прогнозировать будущее состояние на основе обработки данных по текущему и прошлому состояниям:

- технологии Big Data (от англ. «Большие Данные»);
- технологии AI (от англ. Artificial Intelligence — искусственный интеллект);

4) технологии визуализации, в том числе и виртуализации производственных систем, которые дополняют модели этих систем, созданных с применением CAD-технологий путем погружения пользователя в виртуальное трехмерное пространство с помощью специальных портативных устройств (очков, 3D-шлемов и т. п.). Они актуальны для крупных производственных объектов, включая аэрокосмические. Как правило, для действующих производств трехмерное окружение воссоздают на основе физического производства путем построения так называемого облака точек — геометрического отражения этих точек, полученного сканированием реальных объектов оптическими или лазерными приборами с последующим его сведением к известным математическим функциям для уменьшения объема занимаемой памяти пространственной цифровой модели. К примеру, в судостроении в качестве дополнительного успешно применяется модуль, который создан средствами графической платформы Unity к базовому программному инструменту создания моделей производств с целью реализации эффекта присутствия пользователя в виртуальной производственной среде в ходе проведения имитационных экспериментов с ней [3]. Представлены две технологии визуализации и виртуализации:

- VR (от англ. Virtual Reality — виртуальная реальность);
- AR (от англ. Augmented Reality — дополненная реальность), суть которой состоит в добавлении в реальное физическое пространство виртуальных объектов;

5) технологии ГИТ/ГИС (геоинформационные технологии и реализующие их геоинформационные системы) — пространственной и географической привязки объектов производств. Они становятся все более актуальными в связи с выходом производств за рамки отдельных предприятий и необходимостью решать логистические задачи;

6) низкоуровневые служебные технологии, выполняющие специальные функции поддержки процессов эксплуатации и управления вычислительной инфраструктурой (обеспечение безопасности, контроль оборудования, сетевые технологии и др.)

Весь спектр технологий класса 1 разделен на технологии, представляющие модель производства с точки зрения изделия и с точки зрения производства (рис. 1). Это разделение весьма условно, оно обусловлено историческим развитием систем промышленной автоматизации (два полюса — PDM и ERP). Его ввели для того, чтобы подчеркнуть проблему разрывов в преемственности моделей произ-

водства в разных сложившихся системах автоматизации на различных стадиях его жизненного цикла: от проекта, когда облик производства формируется уже в ходе конструкторско-технологической подготовки процесса производства изделия (изделий), до эксплуатации, а затем, в ходе его модернизации, для того чтобы стало возможно изготовить новые или модернизировать выпускавшиеся изделия. В некоторых случаях выясняется, что нецелесообразно использовать существующие решения по автоматизации производства (как зарубежные, так и отечественные) и необходимо создавать принципиально новые подходы и программные системы на их базе. Вместе с тем в условиях высокосложных аэрокосмических производств этот путь сопровождается высокими рисками, связанными с дефицитом времени на отработку/внедрение и неготовностью среды внедрения. Поэтому в настоящее время реализуется эволюционный подход — повышение степени интеграции существующих решений с использованием новых возможностей современных технологий.



**Рис. 1.** Модель производства с различными аспектами представления в традиционных системах промышленной автоматизации

Модель дискретного производства со стороны *изделия* есть результат их конструкторско-технологического проектирования. К используемым для ее формирования технологиям относятся следующие группы.

1. САМ-технологии — содержат относительно модели производства описание монопроцесса, выполняемого в большинстве случаев в рамках одного рабочего места с соответствующим составом средств технологического оснащения (СТО):

— в первую очередь, это технологии геометрического моделирования процессов изготовления, при использовании которой требуется в ходе обработки пространственная координация заготовки, органов оборудования, оснастки. Подразумевается автоматическая обработка без участия человека или с его минимальным участием. Изначально они были ориентированы только на моделирование геометрических характеристик. Однако в последнее время базовую геометрическую модель дополняют специальными расчетными моделями физических процессов (механических, тепловых и др.), позволяющих создавать

цифровые двойники процессов и основанные на них так называемые следящие системы. Пример реализации такой технологии для механической обработки изделий аэрокосмической промышленности с подробным описанием математических моделей, позволяющих учитывать силы резания и механические характеристики материала, представлен в [4]. Первой областью применения подобных технологий была механическая обработка резанием, позднее они были распространены на формообразование (гибку) проката, сварку и др.;

— также в эту группу отнесены технологии численного моделирования процессов изготовления, ориентированные на конкретный метод изготовления: литье, термическую обработку, гальвано-химические процессы и др. Зачастую их относят к CAE-технологиям. Как правило, они основаны на нелинейных дифференциальных уравнениях в частных производных.

2. CAD-технологии — применяют для моделирования процессов сборки, монтажа, увязки конструкций. Они основаны на пространственном (геометрическом) представлении последовательности операций с моделированием механических статических, кинематических и динамических связей.

3. CAPP-технологии — призваны увязывать частные модели отдельных процессов изготовления компонентов в сквозной процесс изготовления изделия, математическая основа их описания — теория множеств и теория графов.

Модель производства со стороны *производства* — это отображение всех ресурсов, предназначенных для изготовления заданной номенклатуры разных изделий и связанных с ними процессов. Обширный перечень технологий этого класса составляют уже зрелые технологии с различной степенью детализации устоявшихся типов моделей производства в рамках сложившейся вокруг них иерархии систем промышленной автоматизации производства, являющиеся де-факто стандартом в промышленности:

— технологии ERP — здесь модель производства представлена на самом верхнем уровне для решения задач объемно-календарного планирования, она дополняет более крупную модель — модель предприятия. В ее состав входит перечень ресурсов производства (оборудование и персонал) с параметрами времени их доступности; используются методы и вычислительный аппарат MRP II;

— технологии APS — оперируют более детальной моделью производства, обеспечивающей пооперационное планирование до конкретных экземпляров ресурсов (оборудование с инвентарным номером, персонал с указанием ФИО). На этом уровне уже требуется настройка модели для конкретной области применения. Для дискретного производства — это модель V-типа, A-типа, X-типа и др. Расчеты

и оптимизация выполняются методами линейного программирования, однако для учета особенностей аэрокосмического производства (дискретное, наукоемкое, проектное или позаказное, многономенклатурное) требуется применение эвристических алгоритмов;

– технологии MES — исполняют планы APS в рамках отдельных производственных подразделений с их оптимизацией под условия конкретной производственной ситуации. Исходя из этого, становится ясно, что в MES-технологиях модель производства должна быть дополнена особенностями производственного подразделения (организованного, как правило, на предметном или технологическом принципе с учетом соответствующей отраслевой специфики), а также фактическими данными, необходимыми для реализации производственного процесса с учетом плановых характеристик. Основные объекты для дискретного производства описаны в ISA-95 и его российском аналоге ГОСТ Р МЭК 62264-1–2014;

– технологии MDC, SCADA, EAM — объединены по признаку описания фактического состояния физических производственных ресурсов. Здесь модель производства может быть представлена совокупностью моделей отдельных производственных ресурсов (не ограничивающихся моделями оборудования), каждый из которых описывается набором возможных состояний и ключевых параметров, зависящих от его вида. Призваны обеспечить данными о фактическом состоянии ресурсов производства и истории таких состояний.

Существенным недостатком и ограничением приведенной группы зрелых технологий в случае их применения для аэрокосмических производств является то, что в них используются модели, не соответствующие в необходимой степени реальному производству. Кроме того, для эффективной информационной поддержки производства требуется также модель управления производством, что привело к появлению технологий, позволяющих минимизировать указанное несоответствие. Сначала их эпизодически применяли для решения конкретных производственных задач, а в настоящее время они эволюционировали, и их готовность достигла такой степени, при которой стало возможным на их основе построить системы поддержки принятия решений (СППР), функционирующие в постоянном режиме. Известны примеры полнофункциональных проектов таких систем, которые могут как дополнить традиционные системы автоматизации производств [5], так и функционировать самостоятельно [6]. В основной перечень таких технологий вошли следующие группы.

1. Технологии имитационного моделирования, содержащие:

– методы дискретно-событийного моделирования (представление производств в понятиях теории систем массового обслуживания: потока заявок (предметов труда) и сети узлов, обрабатывающих заявки за определенное время);

— методы системной динамики (производство моделируется как динамическая система, состоящая из совокупности потоков и накопителей, а также причинно-следственных связей, посредством которых учитываются факторы, влияющие на интенсивность/скорость потоков);

— методы агентного моделирования (используются для наиболее детального представления объектов производственной системы, каждый из которых имеет собственное поведение);

2. Технологии аналитического численного моделирования, когда динамическое состояние производства аналитически моделируется системой дифференциальных уравнений [6]. У этих методов есть один серьезный недостаток, обусловленный тем, что при их применении происходит как можно более близкое имитирование оригинальной системы, заключающееся в том, что сама модель, подобно реальному производству, «не знает», как нужно «правильно» работать для достижения наилучшего результата. Ей, т. е. модели, на входе нужен план, в соответствии с которым она будет выполняться.

Отдельно следует отметить такие технологии, как:

— технологии BIM (от англ. Building Information Model — информационная модель здания), которые хотя и относятся к области моделирования строительных объектов, тем не менее активно используются для информационной поддержки производств, относящихся скорее к строительству, а именно производства крупногабаритных объектов в судостроении, для энергетического хозяйства и др. В аэрокосмической отрасли они применяются при строительстве аэродромов, космодромов и обслуживающих их инфраструктурных объектов. Кроме того, в BIM-технологиях модель производства служит основой, относительно которой выстраиваются элементы модели здания (каркас, инженерные сети, вспомогательное оборудование и др.), т. е. входит в состав модели здания.

— технологии онтологического представления предметной области, являющиеся ключевыми при концептуальном описании производства. Без них невозможно построить сложные информационные системы, а также решить задачи совместимости (интероперабельности) приложений и согласования большого количества частных моделей и инструментов.

В завершение обзора технологий моделирования аэрокосмических производств следует представить их цифровых двойников, к определению которых также применим рассмотренный подход в двух аспектах: «со стороны проектируемого изделия» и «со стороны существующего производства (проекта производства)» (см. рис. 1). Он органично обосновывает причинность известной классификации цифровых двойников на DT-1 и DT-2 (от англ. DT — Digital Twin) [7].

## **I. Промышленные производственные технологии**

1. Технологии, представляющие цифровую модель производства
  - 1) технологии условно со стороны *изделия*:
    - CAM-технологии
      - технологии геометрического моделирования процессов изготовления
      - технологии численного моделирования процессов изготовления, ориентированные на конкретный метод изготовления
    - CAD-технологии
      - технологии геометрического моделирования сборочно-монтажных процессов
    - CAPP-технологии
      - увязка частных моделей процессов в сквозной процесс изготовления изделия
  - 2) технологии условно со стороны *производства*:
    - технологии ERP
      - решение задач объемно-календарного планирования, как правило, на основе MRP-II
    - технологии APS
      - сквозное пооперационное планирование
    - технологии MES
      - исполнение планов APS в рамках отдельных подразделений
    - технологии MDC, SCADA, EAM
      - фактическое состояние производства
2. Технологии, напрямую не связанные с формализацией предметной области производства
  - 1) технологии, обеспечивающие интеграцию и обмен данными:
    - технологии IoT
    - CPS
  - 2) технологии идентификации физических элементов системы производства:
    - машинное зрение
    - радиочастотная идентификация RFID
    - другие
  - 3) технологии, поддерживающие предиктивный анализ:
    - технологии Big Data
    - технологии AI
  - 4) технологии визуализации и виртуализации производственных систем:
    - технологии VR
    - технологии AR
  - 5) технологии ГИТ/ГИС
  - 6) низкоуровневые служебные технологии, реализующие вспомогательные функции

## **II. Технологии систем поддержки принятия решений**

- 1) технологии имитационного моделирования:
  - методы дискретно-событийного моделирования
  - методы системной динамики
  - методы агентного моделирования
- 2) технологии аналитического численного моделирования

## **III. Технологии концептуального моделирования**

## **IV. Технологии BIM**

## **V. Технологии цифровых двойников**

**Рис. 2.** Технологии, используемые для цифрового представления производства

Для их построения используется практически весь спектр перечисленных технологий. Однако, согласно проектам стандартов по цифровым двойникам серии ПНСТ 429–2020 [8], в типовой архитектуре цифро-



вого двойника производства промышленные системы ERP, APS, MES записаны как потребители результатов моделирования в домене пользователя (UD, от англ. User Domain). Отмечено также, что при необходимости они на время или постоянно заменяют собой промышленные автоматизированные системы.

Еще одна особенность, которую также следует отметить, заключается в том, что в Индустрии 4.0 производственная деятельность выходит за рамки не только отдельных предприятий, но и традиционного производства. В ее составе теперь рассматривается деятельность как проектных, так и сертифицирующих и эксплуатирующих организаций. Отличительные характеристики цифровых двойников и используемых цифровых технологий для их создания, применяемых в области сертификации и эксплуатации летательных аппаратов, рассмотрены в [1, 9].

Систематизация (нестрогая) промышленных технологий и технологий моделирования приведена условно на рис. 2.

**Анализ перспектив использования цифровых технологий для моделирования и информационной поддержки аэрокосмического производства.** Этот анализ выполнен с приведением основных сдерживающих факторов внедрения цифровых технологий в порядке их приоритета.

1. Отсутствие эталонной модели производства, под которой понимаются формальное описание и устройство объектов, а также алгоритмы, обеспечивающие эффективную работу (планирование, управление, исполнение) производства в максимально полном автоматическом самонастраиваемом режиме без эвристик или хотя бы с минимальным их применением. Имеется только описание образа производства будущего — гибкое единичное производство с уровнем затрат массового производства. Но при этом не известен и не формализован механизм его функционирования, примером которого в прошлом может служить модель конвейерного производства, предложенная и реализованная еще Г. Фордом. По большому счету, аппарат формального представления многих из перечисленных технологий в основном ориентирован именно на эту модель, что препятствует их эффективному использованию в современных условиях. Возможность ее построения подтверждается практикой существующих отечественных аэрокосмических производств, текущая модель которых определяется стандартами СРПП: производства построены и работают по одним и тем же принципам. В этом случае оптимальным выходом для аэрокосмического производства, и не только его, может стать предложенная Ю.П. Куликом адаптация этой модели — модель переналаживаемого виртуального конвейера с рваным (непостоянным) тактом работы. Идея заключается в том, что сохранившаяся базовая линейная модель конвейерного производства трансформируется в сеть связан-

ных конвейеров, скоординированных в пространстве и во времени. Задача состоит в отыскании наиболее рационального варианта координации для заданных условий производства.

2. Фактор разрыва между моделями производства «со стороны изделия» и «со стороны производства». Есть подходы, выражаемые формулой «проектирование изделий под возможности производства», но пока они реализованы, в лучшем случае, только на уровне проверки возможных вариантов конструкторско-технологических решений по изделиям на частных моделях производства.

3. Проблемы данных, а именно:

1) отсутствие данных, их низкое качество;

2) наличие огромного массива неструктурированных или слабоструктурированных данных;

3) наличие огромного массива структурированных данных. На практике сложился уже типовый случай, являющийся следствием внедрения технологий и систем промышленного мониторинга: данные есть, но непонятно, что с ними делать.

Первая проблема частично решается путем внедрения технологий мониторинга производственных процессов. Но это решение «со стороны производства», являющееся источником получения данных по фактической реализации производственного процесса, не затрагивает проектную часть «со стороны изделия». Часть данных содержится в документации и может быть оцифрована с помощью технологий машинного зрения (такие проекты успешно реализуются в области документооборота в финансовой, отчетной, социальной и других сферах). Оставшаяся неформализованная часть последовательно восполняется с использованием технологий цифровых двойников, а также с формированием баз знаний, позволяющих повторно применять или аппроксимировать и распространить знания на новые случаи. В переходный период отсутствующие данные можно принимать по изделиям, процессам, ресурсам-аналогам, статистическим данным и синтезировать с использованием параметрических моделей.

Вторую и третью проблемы пытаются решить с помощью технологий Big Data и искусственного интеллекта. Решение заключается в поиске зависимостей, осуществляемом алгоритмами машинного обучения в огромном массиве данных о прошлых состояниях производственной системы, для формирования типовых паттернов ее поведения с возможностью дальнейшего прогноза на полученной основе. Сегодня предлагаются типовые проектные решения внедрения таких технологий в производство [10, 11]. Существуют аналитические low-code платформы (дословно с англ. — «мало кода/кодирования/программирования»), значительно облегчающие процесс внедрения благодаря графическому формированию логики обработки данных [12]. Но пока это хорошо работает только там, где процессы производства отличаются относи-

тельной регулярностью, что для условий аэрокосмической промышленности малоприменимо или применимо только для отдельных элементов производственной системы, например, для оборудования с целью предиктивного анализа его состояния. Тем не менее известны случаи эффективного использования данных технологий в зарубежной аэрокосмической промышленности, например, предиктивная сборка крыла с центропланом на заводах компании Boeing [13, 14], сборка консолей крыла и уменьшение веса конструкции планера путем подбора длины крепежных элементов соответствующей толщине пакета [14]. Однако отмечается, что с технологиями машинного обучения больше связаны ожидания для производств будущего.

4. Как указывалось выше, несоответствие современным требованиям моделей, используемых в современных системах управления производством. При этом даже в рамках систем одного и того же класса (например MES) эти модели разные, причем зачастую — «черный ящик». Впервые задача оценки степени такого несоответствия с учетом специфики аэрокосмического производства (групповые операции, сборочные операции, ограничения по срокам годности, возвратные материалы, переналадки, обеспеченность СТО, межоперационные заделы и др.) была поставлена в работе [15] в целях формирования функциональных требований к качеству построения производственных расписаний при внедрении систем планирования и управления производством. В качестве инструмента ее решения был предложен специально разработанный язык описания модели системы позаказного многономенклатурного дискретного производства DPLM (от англ. Discrete Process Modeling Language — язык моделирования дискретных процессов). Этот язык позволяет учесть специфические особенности модели производства, описать ее в универсальных понятиях и представить в виде сети операций с описанием входов/выходов и связанных с ними ресурсов. Далее открывается возможность сопоставления этой модели и функциональности конкретной MES/APS (сама модель скрыта и не декларируется производителем программного обеспечения). Поскольку язык обладает количественной семантикой, побочным результатом является проверка качества расчетного расписания MES/APS относительно определенной по модели области допустимых значений, выполняемая специальной программой-верификатором. Таким образом, решается задача получения корректного, близкого к оптимальному планового состояния производства, по которому будет работать имитационная модель с целью оценки его жизнеспособности в условиях реального производства с последующей корректировкой плана по результатам моделирования.

В работе [16], изданной в 2017 г., были сформулированы основные черты перспективного использования технологий имитационного моделирования: интеграция с системами промышленной автоматизации; всеобъемлющее целостное представление производства с использованием разных техник моделирования на разных уровнях и в разных срезах; автоматическое создание и изменение модели.

Сегодня многое из этого уже реализовано в той или иной мере, в том числе для производств аэрокосмической отрасли. При непосредственном участии автора, причем как в выполнении проектов по решению практических задач промышленности, так в разработке программных решений на базе моделей производств, пройден путь от создания частных (разовых) моделей до появления типовых решений автоматически создаваемых моделей [17–19] с перспективой выхода на системы поддержки принятия решений и штатных цифровых двойников производств, функционирующих в постоянном режиме. Получен также положительный опыт тестирования совместного использования имитационных моделей производств и передовых промышленных решений класса APS/MES.

Эволюция развития решений для отечественного машиностроения приведена на рис. 3. Основное внимание сейчас уделяется задачам интеграции типовых моделей производств в единую систему, интеграции моделей со средствами промышленной автоматизации, решению вспомогательных задач препроцессинга и постпроцессинга с помощью технологий больших данных и искусственного интеллекта.

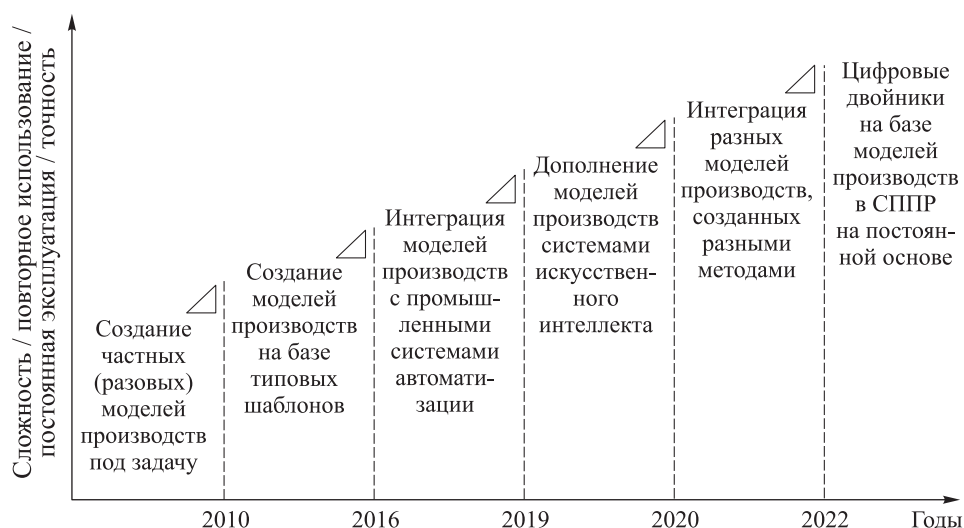


Рис. 3. Развитие решений для моделирования производства на базе технологий имитационного моделирования

Таким образом, в перспективе наиболее целесообразным является путь дополнения промышленных систем автоматизации цифровыми двойниками на базе имитационных моделей производств [20].

5. Несогласованность моделей производств, используемых для решения разных задач, являющаяся следствием перечисленных выше разнообразных подходов к их представлению. Это влечет за собой разные структуры данных и разные их атрибуты, а также приводит к необходимости реализации унифицированных интерфейсов обмена между ними.

Данную проблему решают путем стандартизации. В области Smart Manufacturing (с англ. — умное производство) деятельность развернута на международном уровне в рамках организации ISO (от англ. International Organization for Standardization — Международная организация по стандартизации). Одна из ключевых целей — достижение соглашения по единому определению Smart Manufacturing путем согласования моделей «умного производства», принятых в национальных стандартах стран, и разработки метамодели производства [21]. Из доступных в настоящее время — стандарты по обмену геометрической информацией об изделии (формат STEP, ISO 10303), стандарты в области систем управления производством (отечественные стандарты группы ГОСТ Р МЭК 62264-1–2014, на базе зарубежных ISA-95, IEC 62246-1-2014) и стандарты по цифровым двойникам производств (проекты отечественных стандартов серии ПНСТ 49–2020 на базе международных ISO 23247). Примечательно, что, как показано в [22], в этой области всего два критерия из девяти определяющих архитектуру цифрового двойника производства по направлениям «Интероперабельность», «Информационная модель», «Обмен данными», «Администрирование», «Синхронизация», «Публикация», касаются предметной области информационной модели производства, а остальные связаны с обслуживающими функциями. В настоящее время, по оценкам, приведенным в [23], эта работа находится в начальной фазе, затраты же на реализацию интеграции систем через API (от англ. Application Programming Interface — программный интерфейс приложения) могут достигать 20 % внедрения систем.

В этом отношении отечественные производства находятся в более выгодном положении по сравнению с зарубежными, так как их деятельность изначально регламентирована единой Системой разработки и постановки продукции на производство (ГОСТ Р 15.301–2016), распространяющейся на большинство отечественных предприятий машиностроения, причем в еще большей степени аэрокосмической отрасли. Ее следствием являются единообразные структуры данных, обращающихся в производстве, одинаковые для всех предприятий. Это с успехом используется ведущими отечественными разработчиками сквозных программных решений для машиностроения.

**Анализ перспектив использования цифровых технологий моделирования производств в аэрокосмическом образовании.** Из состава анализируемых технологий моделирования производств наиболее широкое распространение в учреждениях высшего образования получили технологии «от изделия». До недавнего времени вопросы моделирования производств со стороны существующих систем производства широко в вузах представлены не были или были представлены в отрыве от изделия (в рамках соответствующих кафедр автоматизации, специализирующихся по технологиям MES Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», Уфимского государственного авиационного технического университета и др.; по технологиям ERP — Московского авиационного института и др.). Связано это с тем, что непосредственно сами модели, программно реализованные в промышленных «тяжелых» системах класса ERP/APS/MES, как правило, не декларируются и скрыты. Кроме того, для работы с промышленными системами нужен объект их развертывания — действующее производство. Сфера деятельности строительных вузов ограничена использованием технологий класса BIM, в которых не рассматриваются механизмы функционирования производств.

Заполнить эту нишу позволяют технологии имитационного моделирования производств. Использовать их в вузах помогает ряд преимуществ: более низкий порог входа для внедрения; не требуется наличия производственной базы; не ограниченные типовыми шаблонами систем промышленной автоматизации широкие возможности по исследованию и созданию перспективных моделей производств с помощью разных техник моделирования. Сегодня существуют готовые платформенные решения, позволяющие комбинировать в рамках одного программного обеспечения как разные методы моделирования (аналитическое и динамическое) [24], так и разные подходы имитационного моделирования [25]. К тому же, что более важно, посредством этих технологий открываются возможности для реализации стыка формальных представлений производства «со стороны изделия» и «со стороны производственных систем». Опыт также показывает, что эффективное решение задач информационной поддержки производств не является прерогативой кафедр автоматизации, а достигается путем их тесного сотрудничества с кафедрами предметной области (проектного, конструкторского, технологического, производственного профиля).

Дальнейшее изучение моделей производств в рамках конкретных предприятий целесообразно организовывать на базе дополнительного образования. В настоящее время в ведущих корпорациях российской промышленности существуют центры дополнительного образования: Корпоративная академия Роскосмоса, Академия Ростеха, Корпора-

тивная академия Росатома. В академиях эти задачи уже решаются без отрыва от производства и с привязкой к реальным потребностям предприятий. Предварительное получение специалистами теоретической и методической основы описания производственных систем в вузах позволит качественно усилить такую подготовку и ускорить внедрение технологий цифровых двойников в промышленность.

**Заключение.** На основании выполненного обзора технологий моделирования производств и анализа перспектив их применения в аэрокосмических производствах можно заключить, что наиболее перспективным для решения текущих задач является внедрение технологий имитационного моделирования в целях дополнения существующих промышленных систем автоматизации. Теоретической основой для них (при отсутствии пока еще эталонной модели производства будущего) для аэрокосмического производства может служить модель виртуального конвейера.

Использование технологий больших данных и искусственного интеллекта для формирования эталонной модели в настоящее время затруднено, так как, по оценкам специалистов профиля Data Science (дословно с англ. — наука о данных, специализация в области компьютерных наук по разработке и обучению моделей искусственного интеллекта), бесцельный поиск закономерностей в неструктурированных данных к результату не приводит.

Технологии имитационного моделирования производств также могут стать основой знакомства будущих специалистов аэрокосмической промышленности (конструкторов, технологов, производственников и управленцев) с моделями производств в высшей школе. Это позволит заложить теоретические основы анализа и исследования перспективных производств без существенных затрат на внедрение инструментов моделирования в образовательный процесс по сравнению с другими технологиями систем промышленной автоматизации, для изучения которых, помимо дорогостоящих систем, нужен полигон внедрения в виде действующего производства. Будущие специалисты должны получить в вузе и навыки информационного моделирования с использованием также инструментов онтологического моделирования для концептуального системного представления производства и связи частных его моделей. Продолжение обучения в рамках этих технологий, с опорой на полученные в вузе базовые знания, целесообразно проводить в рамках дополнительного профессионального образования в соответствующих учебных центрах, существующих при госкорпорациях.

В процессе встраивания цифровых двойников на базе имитационных моделей в производственную деятельность не обойтись без решения проблем их совместимости (интероперабельности). Несмотря на ряд проблем, предприятия отечественного машиностроения

здесь имеют преимущества, так как по большей части их деятельность регламентирована системой государственных и отраслевых стандартов.

Анализ перечня представленных технологий позволяет сделать вывод, что их развитие ведет к созданию программно-определяемых производств, автоматически перенастраиваемых и подстраиваемых под изменяющиеся внешние и внутренние условия. Однако следует помнить, что технологии сами по себе не позволяют синтезировать проектный облик перспективного производства будущего, проблему описания которого только еще предстоит решить.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рудычева Н. Спрос на цифровизацию промышленности в России увеличится в 14 раз к 2030 г. *CNews Analytics*. 2021, 8 дек. URL: [https://www.cnews.ru/reviews/it\\_v\\_promyshlennosti\\_2021/articles/spros\\_na\\_tsi\\_froviztsiyu\\_promyshlennosti](https://www.cnews.ru/reviews/it_v_promyshlennosti_2021/articles/spros_na_tsi_froviztsiyu_promyshlennosti). (дата обращения 12.07.2022).
- [2] Meyer H., Kamtsiuris A., Zimdahl J., et al. Development of a digital twin for aviation research. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2020, pp. 1–8. DOI: 10.25967/530329
- [3] Долматов М.А., Девятков Т.В. Опыт и перспективы применения технологий виртуальной реальности для визуализации результатов имитационного моделирования функционирования производственных систем судостроительных предприятий. *Труды Десятой Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД–2021)*. Санкт-Петербург, 2021, с. 179–182.
- [4] Hänelad A., Schnellhardt T., Wenklerbd E., et al. The development of a digital twin for machining processes for the application in aerospace industry. In: *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 93*. 2020, pp. 1399–1405. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.017>
- [5] Речкалов А.В., Артюхов А.В., Куликов Г.Г., Новиков В.Н. Концепция системного представления предметной области при формировании цифрового двойника производственного процесса машиностроительного предприятия. *Вестник УГАТУ*, 2022, т. 26, № 1 (95), с. 120–135. [https://doi.org/10.54708/19926502\\_2022\\_26195120](https://doi.org/10.54708/19926502_2022_26195120)
- [6] Скворцов Т.П. *Патент № 2744098 Российская Федерация*, МПК G05B 19/02, G09B 17/02, G06F 9/302, G06F 9/305, G06N 7/06 (2006.01). Автоматизированный комплекс адаптивного управления производством технически сложного изделия посредством системного синтеза на основе полунатурного моделирования: № 2020127624. Оpubл. 02.03.2021. Бюл. № 7, 17 с.
- [7] Боровков А.И., Рябов Ю.А., Кукушкин К.В., Марусева В.М., Кулемин В.Ю. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК. *Вестник Восточно-Сибирской открытой академии*, 2019, № 32, 39 с. URL: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/04\\_april/15/elibrary\\_37180048\\_50837228.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/04_april/15/elibrary_37180048_50837228.pdf) (дата обращения 09.09.2020).
- [8] ПНСТ 429–2020. *Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 2. Типовая архитектура*. Москва, Стандартиформ, 2020., 8 с.
- [9] Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In: *The 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin*, 2012, pp. 1–14. DOI: 10.2514/6.2012-1818



- [10] Племяшова А.Г. Big Data. Каких результатов можно достичь с помощью аналитики больших данных. *Корпоративная и финансовая отчетность. Международные стандарты*, 2019, № 1, 9 с. URL: [https://www.datanomics.ru/wp-content/uploads/2019/02/BigData\\_statya\\_KFO.pdf](https://www.datanomics.ru/wp-content/uploads/2019/02/BigData_statya_KFO.pdf) (дата обращения 04.07.2022).
- [11] *Системы AI на производстве: актуальные задачи, решения, этапы реализации и кейсы*. Москва, Datanomics, 2020.  
URL: <https://www.datanomics.ru/artciles/sistemy-ai-na-proizvodstve-aktualnye-zadachi-resheniya-etapy-realizatsii-i-kejsy> (дата обращения 04.07.2022).
- [12] Low-code платформа Loginom. *Loginom.ru* URL: <https://loginom.ru/platform> (дата обращения 20.07.2022).
- [13] Brunton S.L., Kutz J.N., Manohar K., Aravkin A.Y., Morgansen K., Klemisch J., Goebel N., Buttrick J., Poskin J., Blom-Schieber A., Hogan T., McDonald D. Data-Driven aerospace engineering: reframing the industry with machine learning. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.10740>
- [14] Digital twin framework for manufacturing. *ISO 23247*.  
URL: <https://www.ap238.org/iso23247/> (дата обращения 12.07.2022).
- [15] Архангельский В.Е. Операционная модель производства как стандартный компонент средств оперативного планирования позаказного производства. *VI Международный форум «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса России» (Ижевск, 20–22 июня 2017 г.)*. Ижевск, 2017, 20 с. URL: [https://aamc.ru/wp-content/uploads/2018/06/ИТОПК2017-ArkhangelskyVE-WithNotes\\_v102.pdf](https://aamc.ru/wp-content/uploads/2018/06/ИТОПК2017-ArkhangelskyVE-WithNotes_v102.pdf) (дата обращения 12.07.2022).
- [16] Blaž Rodič. Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. *Organizacija*, 2017, vol. 50, pp. 193–207. DOI: 10.1515/orga-2017-0017
- [17] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618547 Российская Федерация. *Информационно-поисковая система ФИПС: № 2017616541*. Опубликовано 03.08.2017.
- [18] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617219 Российская Федерация. *Информационно-поисковая система ФИПС: № 2020615857*. Опубликовано 02.07.2020.
- [19] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664561 Российская Федерация. *Информационно-поисковая система ФИПС: № 2020663239*. Опубликовано 13.11.2020.
- [20] Кабанов А.А., Дацюк И.В. Системы управления производством ракетно-космической техники: ERP, APS, MES или SIM? *Материалы XLVI Академических чтений по космонавтике*, 2022, т. 4, с. 128–132.
- [21] Swope K. Smart Manufacturing in International Standards. In: *Materials of Global product data interoperability Summit 2019 (2019, November 19)*. URL: <https://gpdisonline.com/wp-content/uploads/2019/09/TheBoeingCompany-Swope-SmartManufacturingStrateg-CAMSC-Open.pdf> (дата обращения 16.06.2022).
- [22] Harper K.E., Ganz C., Malakuti S. Digital Twin Architecture and Standards. *IIC Journal of Innovation*, 2019, pp. 1–12.  
URL: <https://www.iiconsortium.org/news-pdf/joi-articles/2019-November-JoI-Digital-Twin-Architecture-and-Standards.pdf> (дата обращения 14.06.2022).
- [23] Колесников А. Digital twin interoperability. In: *Digital Twins Day 2021 (Москва, 3 марта 2021 г.)*.  
URL: <https://www.tadviser.ru/images/c/cf.pdf?ysclid=15wsltfbk5456262976>. (дата обращения 27.03.2022).
- [24] Обзор Anylogistix. *Anylogistix.ru* URL: <https://www.anylogistix.ru/features> (дата обращения 20.07.2022).

- [25] Многоподходное имитационное моделирование. *Anylogic.ru* URL: <https://www.anylogistix.ru/use-of-simulation/multimethod-modeling> (дата обращения 20.07.2022).

Статья поступила в редакцию 27.07.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кабанов А.А. Моделирование аэрокосмических производств: обзор технологий, методов и перспектив их использования в производствах будущего. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-10-2220>

**Кабанов Александр Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические системы и ракетостроение». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). e-mail: [drdt@mail.ru](mailto:drdt@mail.ru)

SPIN-код: 8260-9509,

Web of Science Researcher ID: ABC-9372-2020,

ORCID: 0000-0003-1989-0499.

## **Simulation in the aerospace industry: review of technologies, methods and prospects of their use in future industries**

© A.A. Kabanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, 125993 Russia

*The paper presents a review of modern technologies used today to various degrees in simulating the production activity. The emphasis is primarily made on production in aviation, space and rocket industries. The work objective is to develop approaches to introduction of technologies in practice today without waiting for the final formation of their implementation environment, which in most cases requires serious preparation, fundamental changes and long-term implementation. Without them, the use is becoming impossible in principle or inefficient. Based on these positions, the methodological foundation of technologies was studied, they were systemized, their potential in solving the current production problems was evaluated, and the prospects for their use in future were considered. Main sources of technology containment were shown. Attention was paid to the issues of standardization in the digital transformation. Possibilities and limitations of using the considered technologies in the education were studied in order to train the highly sought specialists familiar with technologies and possessing skills of their practical implementation. In this context, these technologies are conditionally divided into those that could be studied in higher educational aerospace institutions and those that reasonably could be studied within the framework of additional professional educational programs.*

**Keywords:** *rocket and space production, digital twins, digital simulation technologies, training of specialists*

### REFERENCES

- [1] Rudycheva N. Spros na tsifrovizatsiyu promyshlennosti v Rossii uvelichitsya v 14 raz [Demand for industry digitalization in Russia will increase by 14 times by 2030]. *CNews Analytics*. 2021, December 8. Available at: [https://www.cnews.ru/reviews/it\\_v\\_promyshlennosti\\_2021/articles/spros\\_na\\_tsifrovizatsiyu\\_promyshlennosti](https://www.cnews.ru/reviews/it_v_promyshlennosti_2021/articles/spros_na_tsifrovizatsiyu_promyshlennosti) (accessed July 12, 2022).
- [2] Meyer H., Kamtsiuris A., Zimdahl J., et al. Development of a digital twin for aviation research. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2020, pp. 1–8. <https://doi.org/10.25967/530329>
- [3] Dolmatov V.A., Devyatkov T.V. Opyt i perspektivy primeneniya tekhnologiy virtualnoy realnosti dlya vizualizatsii rezultatov imitatsionnogo modelirovaniya funktsionirovaniya proizvodstvennykh sistem sudostroitelnykh predpriyatiy [Experience and prospects of implementing virtual reality technologies in visualization of simulation modelling results of the shipbuilding enterprises production systems performance]. In: *Trudy Desyatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po imitatsionnomu modelirovaniyu i yego primeneniyu v nauke i promyshlennosti "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2021)"* [Proceedings of the Tenth All-Russian scientific and practical conference on simulation modelling and its introduction in science and industry "Simulation modelling. Theory and practice" (IMMOD-2021)]. Saint Petersburg, 2021, pp. 179–182.

- [4] Hänelad A., Schnellhardt T., Wenklerbd E., et al. The development of a digital twin for machining processes for the application in aerospace industry. In: *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 93*, 2020, pp. 1399–1405. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.017>
- [5] Rechkalov A.V., Artyukhov A.V., Kulikov G.G., Novikov V.N. Kontseptsiya sistemnogo predstavleniya predmetnoy oblasti pri formirovaniy tsifrovogo dvoynika proizvodstvennogo protsessa mashinostroitelnogo predpriyatiya [Concept of the subject area systemic presentation in forming a digital twin of the machine building enterprise production process]. *Vestnik UGATU – Herald of the USATU*, 2022, vol. 26, no. 1 (95), pp. 120–135. [https://doi.org/10.54708/19926502\\_2022\\_26195120](https://doi.org/10.54708/19926502_2022_26195120)
- [6] Skvortsov T.P. Patent no. 2744098 Rossiyskaya Federatsiya. Avtomatizirovanny kompleks adaptivnogo upravleniya proizvodstvom tekhnicheski slozhnogo izdeliya posredstvom sistemnogo sinteza na osnove polunaturalnogo modelirovaniya: no. 2020127624 [Patent no. 2744098, Russian Federation. Automated system for adaptive control in manufacturing a technically complex product by systemic analysis based on the semi-natural simulation: no. 2020127624]. Publ. March 2, 2021, bulletin no. 7, 17 p.
- [7] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Kukushkin K.V., Maruseva V.M., Kulemin V.Yu. Tsifrovye dvoyniki i tsifrovaya transformatsiya predpriyatiy OPK [Digital twins and digital transformation of the MIC enterprises]. *Vestnik Vostochno-Sibirskoy otkrytoy akademii — Herald of the East-Siberian Open Academy*, 2019, no. 32, 39 p. Available at: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/04\\_april/15/elibrary\\_37180048\\_50837228.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/04_april/15/elibrary_37180048_50837228.pdf) (accessed September 9, 2020).
- [8] *PNST 429–2020. Umnoe proizvodstvo. Dvoyniki tsifrovye proizvodstva. Chast 2. Tipovaya arkhitektura* [INST 429–2020. Smart production. Digital twins of production. Part 2. Typical architecture]. Moscow, Standartinform Publ., 2020, 8 p.
- [9] Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In: *The 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin*, 2012, pp. 1–14. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- [10] Plemyashova A.U. Big Data. Kakikh rezultatov mozjno dostich s pomoschyu bolshikh dannykh [Big Data. What results could be obtained using Big Data]. *Korporativnaya i finansovaya otchetnost. Mezhdunarodnye standarty — Corporate and financial reporting. International standards*, 2019, no. 1, 9 p. Available at: [https://www.datanomics.ru/wp-content/uploads/2019/02/BigData\\_statya\\_KFO.pdf](https://www.datanomics.ru/wp-content/uploads/2019/02/BigData_statya_KFO.pdf) (accessed July 4, 2022).
- [11] *Sistemy AI na proizvodstve: Aktualnye zadachi, resheniya, etapy realizatsii i keysy* [AI systems in production: actual tasks, solutions, implementation stages and cases]. Moscow, Datanomics Publ., 2020. Available at: <https://www.datanomics.ru/artciles/sistemy-ai-na-proizvodstve-aktualnye-zadachi-resheniya-etapy-realizatsii-i-keysy> (accessed July 4, 2022).
- [12] Low-code platforma Loginom [Low-code Loginom platform]. *Loginom.ru* Available at: <https://loginom.ru/platform> (accessed July 20, 2022).
- [13] Brunton S.L., Kutz J.N., Manohar K., Aravkin A.Y., Morgansen K., Klemisch J., Goebel N., Buttrick J., Poskin J., Blom-Schieber A., Hogan T., McDonald D. Data-driven aerospace engineering: reframing the industry with machine learning. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.10740> (accessed June 10, 2022).
- [14] Digital twin framework for manufacturing. *ISO 23247*. Available at: <https://www.ap238.org/iso23247/> (accessed July 12, 2022).

- [15] Arkhangelsky V.E. Operatsionnaya model proizvodstva kak standartny komponent sredstv operativnogo planirovaniya pokaznogo proizvodstva [Operation manufacture model as a standard component of operation planning in the demonstrative production]. In: *VI Mezhdunarodny forum "Informatsionnye tekhnologii na sluzhbe oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii (Izhevsk, 20–22 iyunya 2017 g.)* [VI International Forum "Information technologies in serving the military-industrial complex of Russia" (Izhevsk, June 20–22, 2017)]. Izhevsk, 2017, 20 p. Available at: [https://aamc.ru/wp-content/uploads/2018/06/ITOPK2017-ArkhangelskyVE-WithNotes\\_v102.pdf](https://aamc.ru/wp-content/uploads/2018/06/ITOPK2017-ArkhangelskyVE-WithNotes_v102.pdf) (accessed July 12, 2022).
- [16] Blaž Rodič. Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. *Organizacija*, 2017, vol. 50, pp. 193–207. <https://doi.org/10.1515/orga-2017-0017>
- [17] Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM No. 2017618547 Rossiyskaya Federatsiya [Certificate on state registration of computer program no. 2017618547]. *Informatsionno-poiskovaya sistema FIPS: No. 2017616541* [FISS information and search system: no. 2017616541]. Published August 3, 2017.
- [18] Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM No. 2020617219 Rossiyskaya Federatsiya [Certificate on state registration of computer program no. 2020617219]. *Informatsionno-poiskovaya sistema FIPS: No. 2020615857* [FISS information and search system: no. 2020615857]. Published July 2, 2020.
- [19] Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM No. 2020664561 Rossiyskaya Federatsiya [Certificate on state registration of computer program no. 2020664561]. *Informatsionno-poiskovaya sistema FIPS: No. 2020663239* [FISS information and search system: no. 2020663239]. Published November 13, 2020.
- [20] Kabanov A.A., Datsyuk I.V. Sistemy upravleniya proizvodstvom raketno-kosmicheskoy tekhniki: ERP, APS, MES ili SIM? [Control systems in rocket and space equipment production: ERP, APS, MES or SIM?]. In: *Materialy XLVI Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Materials of the XLVI readings on cosmonautics], 2022, vol. 4, pp. 128–132.
- [21] Swope K. Smart Manufacturing in International Standards. In: *Materials of Global product data interoperability summit 2019 (2019, November 19)*. Available at: <https://gpdisonline.com/wp-content/uploads/2019/09/TheBoeingCompany-Swope-SmartManufacturingStrateg-CAMSC-Open.pdf> (accessed June 16, 2022).
- [22] Harper K.E., Ganz C., Malakuti S. Digital twin architecture and standards. *IIC Journal of Innovation*, 2019, pp. 1–12. Available at: <https://www.iiconsortium.org/news-pdf/joi-articles/2019-November-JoI-Digital-Twin-Architecture-and-Standards.pdf> (accessed June 14, 2022).
- [23] Kolesnikov A. Digital twin interoperability. In: *Digital Twins Day 2021 (Moscow, March 3, 2021)*. Available at: <https://www.tadviser.ru/images/c/cf.pdf?ysclid=l5wsltfbk5456262976> (accessed March 27, 2022).
- [24] Anylogistix Review. *Anylogistix.ru* Available at: <https://www.anylogistix.ru/features> (accessed July 20, 2022).
- [25] Mnogopodkhodnoe imitatsionnoe modelirovanie [Multi-approach simulation modelling]. *Anylogic.ru*. Available at: <https://www.anylogistix.ru/use-of-simulation/multimethod-modeling> (accessed July 20, 2022).

**Kabanov A.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Department of Space Systems and Rocket Building, Moscow Aviation Institute (National Research University).  
e-mail: [drdt@mail.ru](mailto:drdt@mail.ru) SPIN-code: 8260-9509, Web of Science Researcher ID: ABC-9372-2020, ORCID: 0000-0003-1989-0499