

**Обзорная статья по тематике секции 7**  
**«Математическое моделирование, суперкомпьютерные технологии и цифровые двойники» XIII Форума по цифровизации оборонно-промышленного комплекса России «ИТОПК-2024»**

*А.И. Боровков, проректор по цифровой трансформации СПбПУ, профессор, руководитель Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг», Научного центра мирового уровня СПбПУ «Передовые цифровые технологии», Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии», Инжинирингового центра (CompMechLab®) СПбПУ, руководитель Комитета по проведению научно-технической экспертизы реализации «дорожных карт» по развитию высокотехнологичных направлений «Новое индустриальное программное обеспечение» и «Новое общесистемное программное обеспечение»*

### **Постановка проблемы**

Сегодня существующие подходы к разработке новой высокотехнологичной продукции оборонной промышленности приводят к продолжительным циклам проектирования и перепроектирования. Традиционный подход, зачастую характерный для оборонной промышленности, предполагает доводку ВВСТ до требуемых характеристик итерационным образом (на основе всего  $\approx 200$ – $500$  целевых показателей, закладываемых в процесс разработки, а также доводки конструкций по результатам многочисленных физических и натурных испытаний), при этом среднее число итераций («проектирование – физические и натурные испытания – устранение несоответствий») может достигать до 5 циклов.

Иллюстрация проблемы приведена в статье Заместителя Председателя Правительства Российской Федерации Ю.И. Борисова (сейчас занимает должность генерального директора Госкорпорации «Роскосмос») в журнале «Военно-промышленный курьер», 2017, № 9 (673): «Мировой опыт показывает, что открытие ОКР по разработке высокотехнологичных образцов ВВСТ с незрелым научно-техническим заделом приводит к увеличению (по сравнению с начальной оценкой) сроков их создания в среднем в 1,9 раза, повышению стоимости разработки в среднем на 40%, а стоимости закупки финальных образцов – на 20%» [1].

### **Решение – технология разработки цифровых двойников**

Передовой технологией, которая способна внести наиболее весомый вклад в создание в кратчайшие сроки новых образцов ВВСТ и обеспечить военно-техническое превосходство над зарубежными аналогами, является цифровой двойник (Digital Twin). Развитие и внедрение технологии цифровых двойников является необходимым условием для обеспечения технологического суверенитета и лидерства на глобальных высокотехнологичных рынках, для которых характерны смещение «центра тяжести» в конкурентной борьбе на этап разработки высокотехнологичной продукции, повышение уровня ее наукоемкости, сокращение сроков вывода новой продукции на рынок, жесткие ограничения по издержкам, высокие требования к потребительским характеристикам.

Достижение целей по обеспечению конкурентоспособности изделий и повышению скорости их вывода на рынок возможно на основе применения технологии разработки цифровых двойников изделий за счет сокращения количества циклов

разработки, производства и испытаний опытных образцов изделия, а также сокращения количества изменений, вносимых в конструкцию при производстве и испытаниях опытных образцов изделий.

### **Цифровые двойники в ОПК: мировой опыт**

Зарубежные страны ведут системную научно-технологическую политику развития технологии цифровых двойников на государственном уровне, в том числе публикуют множество работ в области внедрения технологии цифрового проектирования и моделирования в процессы разработки ВВСТ.

Примерно с 2010 года НАСА регулярно указывает цифровые двойники в своих технологических дорожных картах, а с 2011–2012 годов это понятие используется в контексте разработки истребителя следующего поколения и космических аппаратов.

В 2013 году в документе военно-воздушных сил США «Глобальные горизонты. Глобальное научно-технологическое видение ВВС США» цифровые двойники были названы “фактором, радикально меняющим существующее положение дел” (Game Changers). Наряду с цифровыми двойниками такими факторами в части производства и материалов также указаны передовые производственные технологии и новая парадигма сертификации и аттестации продукции, полученной с использованием передовых производственных технологий.

В Великобритании ведется работа по разработке исследовательской программы в области цифровых двойников, во Франции разрабатывается цифровой двойник-демонстратор наземной боевой машины. Великобритания в партнерстве с Японией и Италией запланировала реализацию Глобальной программы боевой авиации.

Наконец, в 2018 году Министерством обороны США принята Стратегия цифрового инжиниринга (“Digital Engineering Strategy”), подготовленная на основе и во исполнение отдельных положений Стратегии национальной обороны (принята в январе 2018 года) [2], а в декабре 2023 года – Инструкция № 5000.97 по цифровому инжинирингу (DoD Instruction 5000.97, “Digital Engineering”) [3].

Специалисты СПбПУ выполнили перевод ключевых положений Стратегии, перевод представлен в Дайджесте Центра НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии», № 6 (апрель – июнь 2020) [4].

В тексте Стратегии, в частности, сказано следующее:

Чтобы в дальнейшем обеспечить технологическое превосходство США, Министерство обороны США осуществляет трансформацию сложившейся инженерной деятельности в «цифровой инжиниринг» путем включения технологических инноваций в интегрированный подход на основе цифрового моделирования (integrated, digital, model-based approach). Благодаря повышению скорости вычислений, возможностям хранения и обработки информации цифровой инжиниринг должен обеспечить смену парадигмы и переход от традиционного подхода «проектирование – производство – испытания» (traditional-design-build-test methodology) к подходу «моделирование – инженерные расчеты – производство» (model-analyze-build methodology). Использование нового подхода обеспечит апробирование принятых решений, создание прототипов и проведение испытаний изделий в виртуальной среде прежде, чем они будут поставлены на вооружение.

Переход к цифровому инжинирингу позволит при создании новой техники перенести риски в цифровую среду и ускорит процесс поступления образцов ВВСТ в войска.

Инструкция № 5000.97 «Цифровой инжиниринг» (DoD Instruction 5000.97, “Digital Engineering”) подготовлена на основании Стратегии цифрового инжиниринга 2018 года. Перевод Инструкции представлен в дайджесте «Передовые цифровые и производственные технологии» №6 (18-19), июль-декабрь 2023 г. [5]

В тексте Инструкции, в частности, сказано следующее:

Цифровой инжиниринг (digital engineering) – это способ применения и интеграции цифровых моделей и лежащих в их основе данных, направленный на обеспечение процессов разработки, проведения испытаний и оценки, а также материально-технического обслуживания ВВСТ (system).

Цифровой инжиниринг:

Является критически важным практическим подходом, необходимым для выполнения оборонного заказа и тылового обеспечения в условиях нарастающих глобальных вызовов, стремительно меняющихся угроз, быстро развивающихся технологий, нестабильной работы цепочек поставок и увеличения предполагаемого срока службы ВВСТ, находящихся в настоящее время в эксплуатации.

Обеспечивает изменение основного способа передачи информации об образце ВВСТ за счет перехода от использования документов к использованию цифровых моделей и лежащих в их основе данных. Цифровые модели начинают использоваться повсеместно и занимают центральное место в реализации инженерной деятельности.

Средства цифрового инжиниринга представлены несколькими взаимосвязанными составными частями (см. Рисунок 1).

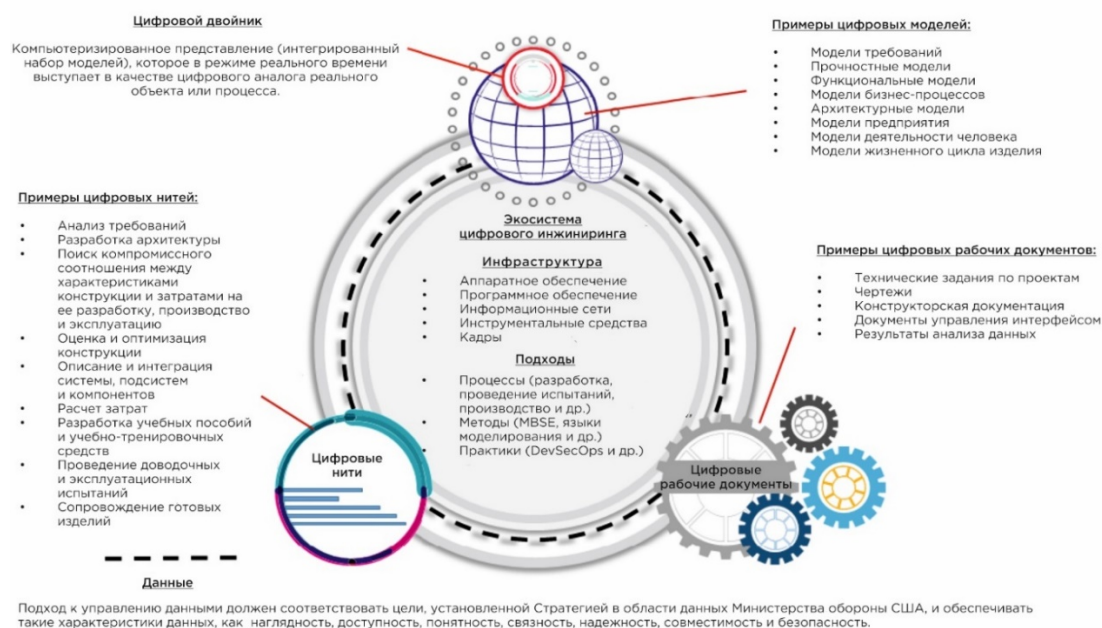


Рисунок 1 – Структура цифрового инжиниринга (DigitalEngineering Framework)  
(Источник: ПИШ СПбПУ)

Разработка моделей (modeling) является неотъемлемым этапом понимания сложных систем вооружения и системных взаимозависимостей, а также обмена

информацией между членами команды и заинтересованными сторонами. Численное моделирование и расчеты (Simulations and analysis) обеспечивают способы исследования различных альтернативных вариантов конструктивных обликов (concepts) и характеристик ВВСТ, способствуют принятию обоснованных решений, а также позволяют оценить тактико-технические характеристики изделий в целом. Разработка моделей и численное моделирование, которое интегрирует все необходимые реальные данные, являются основой для формирования надежного источника достоверных данных.

Для цифровых моделей (digital models) и цифровых двойников (digital twins) должно осуществляться управление конфигурацией. Цифровые модели, включая содержащиеся в них информацию и данные, должны быть доступными для отслеживания вплоть до этапа поступления техники в войска, начиная с момента формирования требований, разработки конструкций, производства, проведения испытаний, обучения и материально-технического обслуживания. Данные цифровых моделей следует учитывать на этапе планирования программ оборонного заказа, а также на таких этапах жизненного цикла ВВСТ, как закупки и привлечение подрядчиков, для того чтобы обеспечить получение соответствующих прав доступа к данным и сохранение функциональности, устойчивости, возможности обновления и доступности образца ВВСТ. Программами оборонного заказа должны быть предусмотрены верификация и валидация базовых конфигураций цифровых моделей (baselines of digital models) перед переходом к каждому следующему этапу реализации программы (technical milestones) *[имеются в виду контрольные точки программ оборонного заказа, предусмотренные, например, в Инструкции Минобороны США № 5000.85, “Major Capability Acquisition” – прим. переводчиков]*.

(с) Цифровой двойник (digital twin) – это виртуальное представление изделия, системы или процесса, в котором используются наилучшие доступные модели, информация с датчиков, входные данные и данные, полученные от реальной системы, для того чтобы отображать (to mirror) и прогнозировать работу и характеристики системы на протяжении всего срока службы соответствующего ей физического двойника, а также информировать об изменениях, происходящих в конструкции системы с течением времени. Возможно существование более чем одного цифрового двойника системы, но все цифровые двойники должны быть основаны на надежных источниках информации (authoritative sources of information) и иметь четко определенные области применения и назначение. Цифровые двойники могут различаться по степени точности в зависимости от области применения (use case).

### **Цифровые двойники изделий: российский опыт**

В настоящее время в оборонно-промышленном комплексе России цифровые двойники отсутствуют. Как правило, во всех отраслях ОПК разработаны и применяются модели, которые были созданы несколько десятилетий назад, зачастую – на основе упрощенных инженерных методик, которые не описывают в полном объеме реальное поведение конструкций. Часто эти модели носят локальный характер и не валидированы, то есть не описывают с высокой степенью точности базовые эксперименты. Кроме того, отсутствуют модели и системы, связывающие потоки

данных, требования к изделиям, результаты натуральных испытаний и математического моделирования работы изделий как на микро- и мезоуровнях, так и на макроуровне – уровне системы / комплекса.

Системообразующим результатом деятельности специалистов СПбПУ для развития технологии цифровых двойников в ОПК и других высокотехнологичных отраслях промышленности является утверждение первого в российской нормативно-правовой системе национального стандарта Российской Федерации серии «Численное моделирование» – ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [6]. Стандарт разработан специалистами Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» под руководством проректора по цифровой трансформации А.И. Боровкова совместно со специалистами ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в соответствии с Программой национальной стандартизации на 2020 год и Программой национальной стандартизации на 2021 год. Стандарт был утвержден 16 сентября 2021 года приказом № 979-ст руководителя Росстандарта А.П. Шалаева и начал действовать с 1 января 2022 года [7].

ГОСТ Р 57700.37–2021 является полностью отечественной разработкой. Впервые в мире введен нормативный документ, сфокусированный на разработке новых изделий с помощью технологии цифровых двойников, а не оцифровке производственной инфраструктуры и логистики, и установлено соответствующее единое определение «цифрового двойника изделия».

Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» официально включен в перечень взаимно признаваемых стандартов в сфере авиастроения между Китайской Народной Республикой и Российской Федерацией 24 ноября 2023 года.

### **Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench<sup>®</sup>, цифровая сертификация**

Для эффективного управления процессами разработки и формирования цепочек технологий в Инжиниринговом центре (CompMechLab<sup>®</sup>) СПбПУ разработана собственная SPDM-система (Simulation Process and Data Management) – Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench<sup>®</sup> (см. Рисунок 2).

## Цифровая сертификация изделий на цифровой платформе CML-Bench®

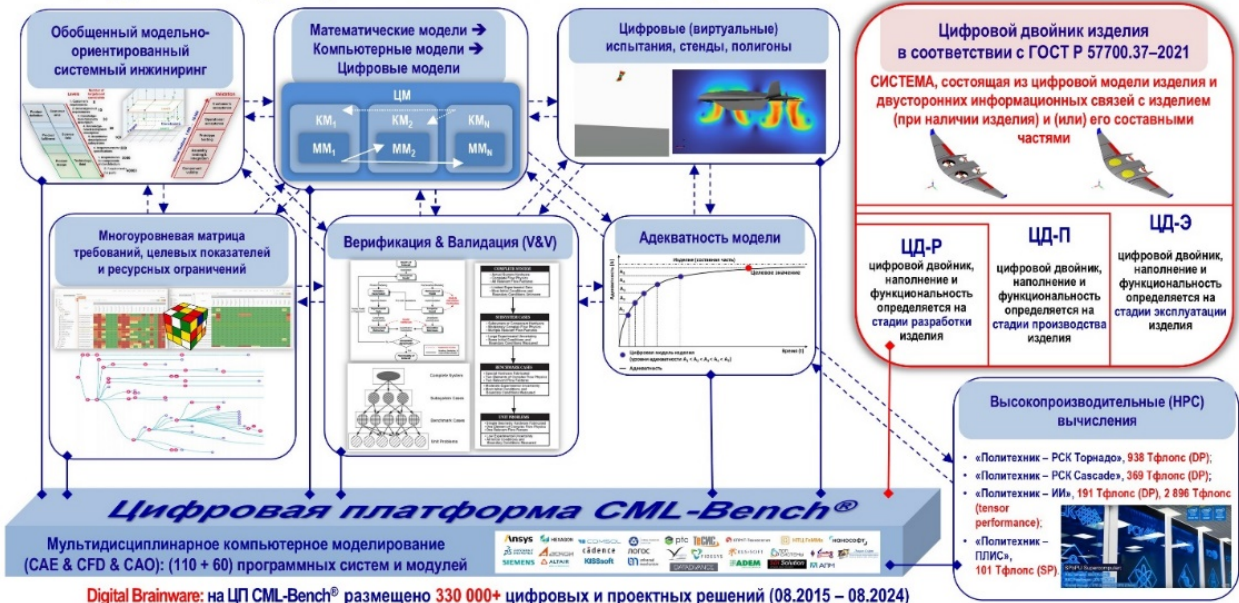


Рисунок 2 – Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench® (Источник: ПИИШ СПбПУ)

Цифровая платформа CML-Bench® предназначена для автоматизации ключевых инженерных процессов, связанных с мгновенной кастомизацией, цифровым проектированием, моделированием, виртуальными испытаниями и подготовкой всей необходимой производственной документации, посредством трансдисциплинарного и надотраслевого компьютерного инжиниринга. Работу платформы обеспечивают высокопроизводительные вычислительные системы с пиковой производительностью 2,3 ПФлопс и широкий спектр специального инженерного программного обеспечения (CAD / CAE / CAO / CAx / PDM / PLM).

16 февраля 2021 года Министр цифрового развития, связи и массовых коммуникаций России М.И. Шадяев после прохождения экспертизы подписал приказ № 84 от 16.02.2021 о включении Цифровой платформы CML-Bench® в Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных.

За 2023–2024 годы существенно расширены возможности совместимости цифровой платформы CML-Bench® с отечественным инженерным программным обеспечением. Так, по состоянию на февраль 2022 года платформа включала 110 программных систем и модулей, в то время как по состоянию на август 2024 года платформа насчитывает более 170 интегрированных программных систем и модулей. В их числе – отечественные разработки ООО «Тесис» (FlowVision), ООО «Фидесис» (CAE Fidesys), ООО «Вычислительная механика» (Универсальный механизм), ООО «Тор» (ELCUT), ООО «Кванторформ» (QForm) и др. Запланирована интеграция с платформой «Логос» разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

За счет проведения большого числа цифровых (виртуальных) испытаний, в том числе на специализированных цифровых (виртуальных) стендах и полигонах, на цифровой платформе CML-Bench® становится возможным реализовать на практике **цифровую сертификацию** – специализированный бизнес-процесс, основанный на

тысячах (десятках тысяч) цифровых (виртуальных) испытаний как отдельных компонентов, так и системы в целом. Целью цифровой сертификации является **прохождение с первого раза всего комплекса натуральных, сертификационных и прочих испытаний** (в соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 7 ноября 2023 года № 3113-р об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации) [8–11], что значительно сокращает сроки и стоимость вывода на рынок новых типов ВВСТ. Принципиальным является закрепление на федеральном уровне определения цифровой сертификации, впервые предложенного и применяемого Инжиниринговым центром СПбПУ с 2014 года [12; 13]. Важно, что это определение формировалось постепенно, в ходе рабочих встреч А.И. Боровкова, проректора по цифровой трансформации СПбПУ, и **А.Р. Белоусова**, помощника Президента Российской Федерации (сейчас занимает пост **Министра обороны Российской Федерации**, ранее – Первый Заместитель Председателя Правительства Российской Федерации), в 2016–2017 гг. в рамках подготовки плана мероприятий («дорожной карты») «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы к рассмотрению и дальнейшему одобрению 14 февраля 2017 года на заседании президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России.

Технология цифровых двойников была применена и подтвердила свою эффективность в реализации командой инженеров СПбПУ под управлением А.И. Боровкова целого ряда НИОКР при разработке высокотехнологичных изделий ОПК.

Проекты СПбПУ по разработке ВВСТ реализованы в интересах предприятий оборонно-промышленного комплекса представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Некоторые проекты СПбПУ, выполненные в интересах оборонно-промышленного комплекса (Источник: ПИШ СПбПУ)

## **Цифровая платформа CML-Bench® и формирование отрасли БАС в России**

Широкий спектр задач в области развития цифровой платформы CML-Bench® также включает задачи по формированию в России конкурентоспособной отрасли беспилотных авиационных систем (БАС).

В 2023 году Передовая инженерная школа СПбПУ «Цифровой инжиниринг» активно включилась в реализацию **Стратегии развития беспилотной авиации РФ** на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. № 1630-р) [14], в план реализации которой включено мероприятие 2.4: «Создание и развитие отечественной цифровой платформы в целях оптимизации методик проектирования беспилотных авиационных систем и их компонентов». В январе 2024 года в России запущен национальный проект «Беспилотные авиационные системы» (утвержден 26.12.2023 на заседании проектного комитета), в рамках которого реализуются пять федеральных проектов, соответствующие ключевым направлениям Стратегии развития беспилотных авиационных систем (БАС). В числе федеральных проектов: У5 – Разработка, стандартизация и серийное производство беспилотных авиационных систем и их комплектующих (ответственный ФОИВ – Минпромторг России, руководитель – В.В. Шпак).

Передовая инженерная школа СПбПУ «Цифровой инжиниринг» выиграла стратегически важный конкурс и 26 июля 2024 года заключила первый контракт с АНО «Федеральный центр беспилотных авиационных систем» (АНО «ФЦ БАС») на «Оказание услуг по развитию системы построения виртуальных испытательных стендов и виртуальных испытательных полигонов, проведение цифровых испытаний элементов беспилотных летательных аппаратов на базе единой цифровой платформы разработки и применения цифровых двойников БАС» [15].

В целях реализации мероприятия 2.4, а также в рамках реализации **Национального проекта по развитию БАС**, ПИШ СПбПУ выполняет работы по созданию единой среды проектирования БАС на базе цифровой платформы CML-Bench®. Содержательное наполнение цифровой платформы позволяет осуществлять разработку различных типов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА): самолетного и вертолетного типов, мультироторных систем, конвертопланов, гибридных БПЛА, объединяющих преимущества БПЛА разных типов, беспилотных гидросамолетов и самолетов-амфибий и т.д. CML-Bench® легла в основу создания и развития отечественной цифровой платформы проектирования БАС в рамках ФП «Разработка, стандартизация и серийное производство беспилотных авиационных систем и комплектующих».

В 2023 году в инициативном порядке сотрудниками Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг» в кратчайшие сроки (за 5 месяцев) разработан и изготовлен опытный образец БПЛА «Снегирь-1» [16]. В результате проведенных работ подготовлена производственная площадка для изготовления опытных образцов беспилотных летательных аппаратов.

Макет беспилотного летательного аппарата «Снегирь-1» был представлен Заместителю Председателя Правительства Российской Федерации, Министру



промышленности и торговли Российской Федерации Д.В. Мантурову на Всемирном фестивале молодёжи – 2024 в марте 2024 года.

Опытный образец «Снегирь-1» также был представлен специальному представителю Президента Российской Федерации по вопросам цифрового и технологического развития, генеральному директору АНО «Платформа НТИ» Д.Н. Пескову и 40 отраслевым экспертам, руководителям производственных предприятий, АНО «Платформа НТИ» и АНО «Университет 2035» в рамках семинара по формуле автономности дрона под председательством Д.Н. Пескова в марте 2024 года, прошедшего в Передовой инженерной школе СПбПУ «Цифровой инжиниринг».

В настоящее время завершена разработка усовершенствованной модели БПЛА «Снегирь-1.5» с гибридной компоновкой на основе сочетания мультироторной и самолетной схем (вертикальный взлет / посадка и горизонтальный полет) и изготовлен опытный образец, который представлен на Международном военно-техническом форуме «Армия-2024» в августе 2024 года [17].

В результате проведенных работ по проектированию собственных БПЛА в Передовой инженерной школе СПбПУ был сформирован коллектив инженеров, подготовлена производственная площадка для изготовления опытных образцов изделий и рассмотрены пути интеграции технологий системного цифрового инжиниринга в производство БПЛА разных типов на 2025–2026 гг., создано специализированное Опытно-конструкторское бюро в ПИИ СПбПУ «Цифровой инжиниринг».

В рамках проекта, направленного на создание и развитие системы построения цифровых (виртуальных) испытательных стендов и полигонов, проведение цифровых испытаний элементов беспилотных летательных аппаратов на базе единой цифровой платформы по разработке и применению цифровых двойников **CML-Bench.БАС™**, запланировано к разработке 5 цифровых (виртуальных) полигонов, в их числе – ВИП «Аэродинамика», ВИП «Аэроупругость и нагрузки», ВИП «Прочность», ВИП «Металлические материалы» и ВИП «Композиционные материалы». Суммарно за весь период реализации проекта по состоянию на август 2024 года разработано 4 ВИП, 12 ВИС и более 125 моделей, обеспечивающих разработку и проведение испытаний различных типов беспилотных летательных аппаратов.

В 2024 году для адаптации цифровой платформы **CML-Bench®** в отрасли БАС и развития **CML-Bench.БАС™** будут разработаны программные модули: «База знаний» (компоненты: «Декомпозиция БПЛА», «Библиотека требований», «Свойства и модели материалов»), «Интеграция с ИТ-инфраструктурой» (компоненты интеграции с PLM-решениями, с САХ-решениями, с вычислительной инфраструктурой), «Цифровая сертификация» (компоненты: «Библиотека нормативно-справочной информации», «Сертификационный базис», «Методы определения соответствия»), «Проектирование». К концу 2024 года планируется разработка и производство опытного образца «Снегирь-2» с усовершенствованной конструкцией, выполненной из композиционных материалов.

Особо подчеркнем, что **представленные в данном документе технологии, инструменты и методы являются инвариантными для различных отраслей оборонно-промышленного комплекса**, то есть могут применяться и уже эффективно применяются для решения сложных наукоемких задач авиационной и ракетно-

космической промышленности, кораблестроения, промышленности боеприпасов и спецхимии, производства стрелкового оружия, бронетанковой техники, артиллерийского вооружения и т. д.

### Список литературы:

1. *Борисов Ю.И.* Особый задел // Военно-промышленный курьер. – 2017. – № 9 (673). – С. 4–5.
2. Department of Defense. Digital Engineering Strategy. – Washington, D.C. – June 2018. – URL: <https://fas.org/man/eprint/digeng-2018.pdf> (дата обращения: 26.08.2024).
3. DoD Instruction 5000.97, “Digital Engineering” – DoD Directives Division, 2023: DoD Directives Division, 2023. – URL: [https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/500097r.PDF?ver=bePIqKXaLUTK\\_Iu5iTNREw%3D%3D](https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/500097r.PDF?ver=bePIqKXaLUTK_Iu5iTNREw%3D%3D) (дата обращения: 26.08.2024).
4. *Рябов Ю.А., Корчевская А.А., Хуторцова А.Т.* Стратегия цифрового инжиниринга в реализации стратегии национальной обороны США (перевод с английского языка на русский язык) // Дайджест № 6 Центра НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии». – 2020. – Апрель – июнь. – С. 114–120. – URL: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/05/22/Digest\\_6\\_2020\\_Preview.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/05/22/Digest_6_2020_Preview.pdf) (дата обращения: 09.09.2024).
5. *Хуторцова А.Т., Корчевская А.А., Рябов Ю.А.* Инструкция Министерства обороны США № 5000.97 «Цифровой инжиниринг»: пер. с англ. документа “DoD Instruction 5000.97, “Digital Engineering” // Передовые цифровые и производственные технологии. – 2023. – Выпуск № 6. – С. 186–191. – URL: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/05/21/PD\\_may2024\\_postr.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/05/21/PD_may2024_postr.pdf) (дата обращения: 10.09.2023).
6. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование «Цифровые двойники изделий». – URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=241313> (дата обращения: 10.09.2024).
7. Утвержден первый в мире стандарт в области цифровых двойников изделий, разработанный сотрудниками Центра НТИ СПбПУ и РФЯЦ-ВНИИЭФ. – URL: <https://fea.ru/news/7881> (дата обращения: 06.09.2024).
8. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench<sup>®</sup> (часть 1) / А. Боровков, В. Бураков, Е. Мартынец, Ю. Рябов, Л. Щербина // САПР и графика. – 2023. – № 8. – С. 42–51. – URL: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/10/24/SBPU\\_8\\_23\\_edit.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/10/24/SBPU_8_23_edit.pdf) (дата обращения: 06.09.2024).
9. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench<sup>®</sup> (часть 5) / А. Боровков, С. Чишко, Е. Мартынец, Ю. Рябов // САПР и графика. – 2024. – № 7. – С. 4–16. – URL: <https://sapr.ru/article/26704> (дата обращения: 05.09.2024).
10. *Боровков А.И., Рябов Ю.А.* Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности: сборник трудов научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 20–22 июня 2019 г.) / под ред. А.В. Бабкина. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – С. 234–245. – URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/06\\_june/24/INPROM\\_Cifrovye\\_dvoyniki.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/06_june/24/INPROM_Cifrovye_dvoyniki.pdf) (дата обращения: 06.09.2024).

11. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.11.2023 г. № 3113-р. – URL: <http://government.ru/docs/all/150406/> (дата обращения: 06.09.2024).

12. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Марусева В.М. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии / МШУ СКОЛКОВО. – 2018. – С. 24–44. – URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/04\\_april/09/cifrovoye-proizvodstvo0318.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/04_april/09/cifrovoye-proizvodstvo0318.pdf) (дата обращения: 10.09.2024).

13. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, В.М. Марусева, В.Ю. Кулемин // Оборонная техника. – 2018. – № 1. – С. 6-33. – URL: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/05\\_may/17/oboronnaya-technika.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/05_may/17/oboronnaya-technika.pdf) (дата обращения: 10.09.2024).

14. Правительство утвердило Стратегию развития беспилотной авиации до 2030 года. – URL: <http://government.ru/docs/48875/> (дата обращения: 09.09.2024).

15. Передовая инженерная школа СПбПУ «Цифровой инжиниринг» выиграла стратегически важный конкурс и заключила контракт с АНО «Федеральный центр беспилотных авиационных систем» - FEA.RU | CompMechLab - разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/НПС. – URL: <https://fea.ru/news/8904> (дата обращения: 26.08.2024).

16. Итоги деятельности в 2023 году структурных подразделений Экосистемы технологического развития СПбПУ - FEA.RU | CompMechLab - разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/НПС. – URL: <https://fea.ru/news/8717> (дата обращения: 10.09.2024).

17. Представители ПИИ СПбПУ «Цифровой инжиниринг» приняли участие в мероприятиях военно-технического форума «Армия-2024» - FEA.RU | CompMechLab - разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/НПС. – URL: <https://fea.ru/news/8911> (дата обращения: 26.08.2024).