

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Коваль С.Н.* , Бадерников А.В.** , Шмотин Ю.Н., Пятунин К.Р.

Объединенная двигателестроительная корпорация (ОДК),

пр-т Буденного, 16, Москва, 105118, Россия

** e-mail: s.koval@uecrus.com*

*** e-mail: artem.badernikov@uec-saturn.ru*

Статья поступила в редакцию 30.03.2021

Рассматриваются вопросы использования технологий цифрового двойника (ЦД) в рамках реализации продуктовых программ и совершенствования технологий проектирования при разработке газотурбинных двигателей (ГТД). Особое внимание уделено большому опыту использования методов численного моделирования и высокопроизводительных вычислений при создании современной и конкурентоспособной продукции предприятиями ОДК. Обозначены некоторые проблемные вопросы, и намечены пути их решения.

Ключевые слова: технологии цифрового двойника, проекты цифровой трансформации ОДК, математические модели этапов жизненного цикла ГТД.

Введение

Цифровая революция уже идет полным ходом, и ни одной отрасли не удается остаться в стороне от нее. Сегодня у российских компаний появляется уникальный шанс реализовать свой потенциал в ходе цифровизации и занять достойное место среди ее лидеров.

Актуальность использования новых технологий цифровой революции обусловлена следующими проблемами-вызовами:

- сжатыми сроками разработки изделий сейчас и в будущем;
- растущей сложностью разработки и проектирования изделий;
- ужесточением требований технического задания.

Среди приоритетов инновационного развития ОДК выделяются следующие направления: единая стратегия научно-технического развития отрасли, которая определяет перечень критических технологий и направления трансформации индустриальной модели ОДК; ключевые продуктовые программы двигателестроения по направлениям авиации, наземных и морских газотурбинных агрегатов; проекты цифровой трансформации ОДК, задачей которых является достиже-

ние стратегических целей корпорации, в том числе сокращения сроков вывода новой продукции на рынок.

В рамках данных стратегических направлений ОДК идет по пути всестороннего внедрения цифровых технологий при проведении исследований, выполнении опытно-конструкторских работ, в производстве и послепродажном обслуживании. Уже сегодня цифровые технологии позволяют:

- увеличить скорость принятия технических решений;
- обеспечить выполнение многих требований технического задания с первого опытного экземпляра;
- организовать безбарьерную среду для работы инженеров в рамках кооперации предприятий ОДК;
- снизить затраты на поздних этапах опытно-конструкторских работ (ОКР) и при выполнении ОКР по модификациям.

Цифровые технологии позволяют не просто автоматизировать текущие процессы, но и сформировать новые, обладающие новыми качествами и способствующие тому, чтобы продукция ОДК являлась конкурентоспособной и востребованной на мировом рынке.

Для достижения данной цели важно аккумулировать лучшие технологии, лучшие ресурсы в области высоких технологий: инженерные центры, стартапы, научные коллективы, находящиеся в высших учебных заведениях, институтах Российской академии наук. Это амбициозная задача, фактически означающая, что нужно стать вдвое эффективнее, чтобы удовлетворить потребности заказчика. Перспективным направлением для решения данной задачи является цифровой двойник [1–3].

Впервые определение цифрового двойника было предложено профессором Мичиганского университета Майклом Гривсом: «Набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактический реальный произведенный продукт...» [4].

Применение технологии «цифровой двойник» при разработке газотурбинного двигателя

Цифровой двойник газотурбинного двигателя – технология, основанная на комплексе адекватных математических моделей разного уровня сложности, уточняемых по результатам натурных экспериментов, позволяющая получить первый натурный образец, соответствующий установленным техническим требованиям, а также достоверно описывающая и предсказывающая поведение ГТД на всех этапах его жизненного цикла [5, 6].

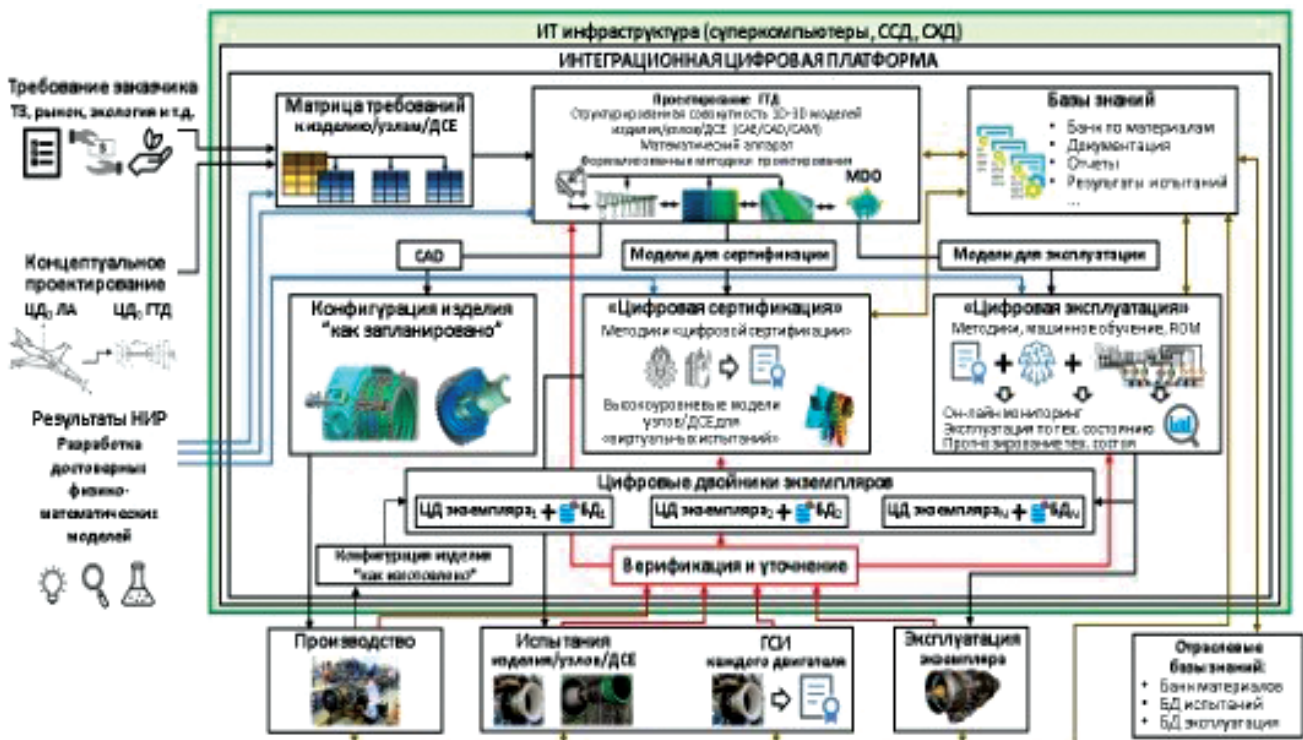
Цифровой двойник изделия необходимо разрабатывать на ранних этапах научно-исследовательских работ и на базе интеграционной цифровой платформы.

Интеграционная цифровая платформа (ИЦП) – специализированное программное обеспечение, которое объединяет в себе программные продукты и технологии, организует взаимосвязь между ними, формирует их иерархию, обеспечивает хранение истории изменений и взаимодействие с различными базами данных (БД) (внутренними на предприятии и внешними отраслевыми), цифровыми платформами и сервисами, используемыми на всех этапах жизненного цикла (проектирование, испытания, серийное производство, эксплуатации и сервисное обслуживание).

Разработка и использование ЦД на базе ИЦП основывается на ИТ-инфраструктуре разработчика изделия. ИЦП должна содержать в себе модуль администрирования вычислительных мощностей и модуль управления и учёта деятельности сотрудников, занятых в создании и использовании ЦД.

Функциональная схема ЦД ГТД (см. рисунок) включает в себя три основных блока:

1. Работы, предшествующие созданию ЦД ГТД (элементы «требования заказчика», «концептуальное проектирование», «результаты научно-исследовательских работ»).



Функциональная схема ЦД ГТД

2. Непосредственно функциональная схема ЦД ГТД (все элементы внутри интеграционной цифровой платформы на этапах эскизного, технического проектов).

3. Использование ЦД ГТД на этапах проектирования, испытаний, производства и эксплуатации (элементы «производство», «испытания», «эксплуатация», «отраслевые БД»).

Применение технологии цифрового двойника в разработке ГТД включает в себя формализованные методики, по которым проводится проектирование изделия, его узлов, систем и деталей или сборочных единиц, совокупность моделей разного уровня сложности, используемых на разной стадии проектирования, развития данных моделей, историю проектирования (в том числе «тупиковые» ветви разработки). Обязательной частью блока является наличие модуля параметрической (в том числе многодисциплинарной) оптимизации. Блок тесно связан с матрицей требований и во многих случаях может в зависимости от результатов проектирования изменять матрицу требований (см. рисунок) в части, касающейся вариантов конкретной реализации требований заказчика. Этап проектирования включает: техническое предложение научно-исследовательских работ, эскизный проект, технический проект и сертификацию ОКР [7, 8].

Помимо математических моделей, используемых для определения облика изделия, в ходе проектирования формируются математические модели, которые будут использоваться для цифрового сопровождения сертификационных испытаний и эксплуатации [9].

Для уменьшения времени создания математических моделей (особенно тех моделей, которые будут использоваться на этапах жизненного цикла после проектирования) необходимо формализовать процесс разработки моделей в ходе проектирования и по возможности придерживаться принципа модульности при их создании [10].

Проекты и программы ОДК, реализуемые с применением технологии цифрового двойника

В течение 2020 г. в ОДК были инициированы проекты по созданию цифровых двойников изделий, находящихся на различных этапах жизненного цикла.

В рамках работ по цифровому двойнику планируется развить следующие направления:

1) провести валидацию математических моделей и программного обеспечения (ПО), используемого при создании ГТД;

2) разработать методологию создания цифрового двойника;

3) создать систему взаимосвязанных математических моделей двигателя и его составных частей;

4) разработать концепцию и технологию «стыковки» цифровых двойников силовой установки и объекта применения;

5) разработать технологические решения по передаче, обработке и хранению большого количества данных;

6) разработать технологические решения, обеспечивающие безопасность хранимых, обрабатываемых и передаваемых данных;

7) создать автоматизированные частично параметризованные цепочки CAD – CAE для основных узлов ГТД;

8) организовать цифровое сопровождение испытаний модернизированных двигателей на основе валидированных математических моделей их базовых серийных версий;

9) выполнить валидацию, настройку и интеграцию в процесс проектирования отечественного программного обеспечения.

Цифровая сертификация

На сегодняшний день сертификация занимает достаточно большой период времени. Это связано с проведением большого количества специальных испытаний ГТД, а также с необходимостью внесения изменений в конструкцию двигателя на поздних этапах его разработки, в случае если эти испытания не проходят успешно с первого раза, что значительно превышает стоимость и сроки доводки изделия. В перспективе применение технологии ЦД позволит разработчикам авиационных двигателей снизить риски и финансовые потери, из-за необходимости повторных сертификационных испытаний двигателей и связанных с этим простоев производственных мощностей и позднего выхода изделия на рынок [11, 12].

Использование численного моделирования высокого уровня соответствия реальным испытаниям в рамках технологии цифрового двойника, а также разработка специализированных методик валидации математических моделей и анализа результатов вычислений позволят значительно повысить качество проведения натурных испытаний и сократить их объем, а в некоторых случаях заменить их расчётным обоснованием на базе математических моделей, валидированных по результатам многочисленных экспериментов.

В результате появляется возможность уменьшить время и затраты на сертификацию двигателя [13]. Несмотря на то что почти все узлы и системы ГТД могут быть смоделированы, точность некоторых математических моделей все еще не позволяет не только заменить испытания, но даже обеспечить приемлемую точность для принятия технического решения по изменению конструкции. В этом плане предстоит еще серьезная работа с научными институтами и малыми инжиниринговыми компаниями по развитию научного базиса физических процессов в ГТД, численных методов решения систем уравнений, сочетающих различные физические процессы, и по разработке на их основе прикладного программного обеспечения [14, 15]. Также стоит задача развития взаимодействия с сертификационными центрами и организациями-заказчиками по расширению области применения методов численного моделирования для подтверждения требуемых показателей безопасности эксплуатации ГТД в рамках сертификационных испытаний [16].

Создание цифровой платформы

Большинство российских компаний начинают «пробовать себя» в области цифровизации с попытки создания инфраструктуры для широкой работы с разнообразными данными. При этом мировая практика показывает, что наиболее успешно управление данными внедряют компании, одновременно фокусирующиеся на трех факторах:

- формирование четкого видения и стратегии использования цифровых технологий;
- успешной реализации выбранных проектов;
- непрерывном развитии цифровой платформы, являющейся общей интегрирующей средой для разнообразных данных и задающей правила оперирования ими [17, 18].

В настоящее время в ОДК осуществляются работы, направленные на развитие цифровой платформы по следующим направлениям:

- организация взаимосвязи между компонентами ЦД;
- формирование иерархии компонентов;
- хранение истории изменений расчетных моделей;
- взаимодействие с базами данных, другими цифровыми платформами и сервисами, используемыми на всех этапах жизненного цикла;
- охват всех этапов жизненного цикла изделия от разработки до утилизации;

- сквозное управление требованиями на уровне двигателя, систем/узлов и деталей, ограничивающих ресурс;
- обеспечение цифровой непрерывности процессов разработки, испытаний и серийного сопровождения;
- создание автоматизированных цепочек инженерных расчетов;
- сосредоточение данных расчётов, производства, испытаний и эксплуатации на единой платформе;
- пополнение базы валидированных расчетных моделей;
- обеспечение масштабируемости платформы;
- разработка и интеграция в платформу методов предиктивной аналитики для оценки ресурса по данным замеров на двигателе в эксплуатации.

Стоит отметить, что основными игроками, работающими в этом направлении на рынке РФ, являются Сименс, АНСИС, Т-флекс, Центр НТИ СПбПУ, ДАТАДВАНС, IPS (Белоруссия). Каждая из компаний, разрабатывающих и распространяющих прикладное инженерное ПО, уже на протяжении 10 лет идет по пути создания интегрирующих платформ для сопровождения жизненного цикла. Это открывает широкие возможности как для выстраивания экосистем различных продуктов, взаимно дополняющих друг друга, так и для привлечения государственной поддержки разработки отечественного программного обеспечения для высокотехнологических промышленных компаний [19, 20].

Выводы

1. Предприятия ОДК имеют опыт использования численных методов и высокопроизводительных вычислений при создании современной и конкурентоспособной продукции.
2. Разработка и проектирование изделия выполняется территориально распределенными командами, что увеличивает объем информации, которым необходимо управлять.
3. Требуется постоянное уменьшение сроков разработки новых изделий не просто за счет автоматизации работ численного моделирования и цифровизации процессов проектирования, но и за счет внедрения новых бизнес-процессов при разработке ГТД.
4. Первый натурный образец должен соответствовать установленным техническим требованиям на всех этапах жизненного цикла.

5. В ОДК инициируются проекты создания цифрового двойника в рамках реализации продуктовых программ и совершенствования технологий проектирования.

Библиографический список

1. Шаманский Д. Технологии проектирования, технологии производства, технологии мышления: Интервью с А.И. Боровковым // Инновации. 2017. № 11(229). С. 6-14.
2. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: Экспертно-аналитический доклад. – М.: Инфраструктурный центр «Технет» НТИ, 2019. – 58 с.
3. Grieves M. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management. — Space Coast Press, 2011. — 370 p.
4. Grieves M. Product Lifecycle Management: the new paradigm for enterprise // International Journal of Product Development. 2005. Vol. 2(1/2), pp. 71-84.
5. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC. 2014. URL: <https://docplayer.net/37776975-Digital-twin-manufacturing-excellence-through-virtual-factory-replication.html>
6. 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/12/cifrovoye-proizvodstvo-032018.pdf
7. Пятунин К. Цифровой двойник в проектах Сатурна // Корпоративный журнал «Трамплин к успеху». 2020. № 15. С. 20-22.
8. Greenfield D. How to Get Started with the Digital Twin // Automation World. 2018. URL: <https://www.automationworld.com/products/software/blog/13319216/how-to-get-started-with-the-digital-twin>
9. Lu Y., Xu X. A digital twin reference model for smart manufacturing // CIE48 Proceedings (2-5 December 2018, the University of Auckland). Vol.147.
10. Шаронов А., Атнашев М., Шерейкин М. и др. Цифровое Производство: методы, экосистемы, технологии: Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления Сколково. 2017. URL: http://tpp74.ru/storage/tsifrovoye_proizvodstvo_112017.pdf
11. Bauerenhansl T., Hartliffe S., Felix T. The Digital Shadow of production – A concept for the effective and efficient information supply in dynamic industrial environments // Procedia CIRP. 2018. Vol. 72, pp. 69-74. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.188
12. Global Horizons. Final Report. United States Air Force Global Science and Technology Vision. URL: <https://www.hsdl.org/?view&did=741377>
13. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 октября 2017 г. № 1251 «Об утверждении Правил предоставления субсидии из федерального бюджета на оказание государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций и Положения о проведении конкурсного отбора на предоставление грантов на государственную поддержку центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций». URL: http://www.rvc.ru/nti/centers/resolution_nti.pdf
14. Милуков И.А., Роголев А.Н., Соколов В.П. Подходы к интеграции конструирования и технологического проектирования // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 4. С. 59-70. DOI: 10.34759/vst-2020-4-59-70
15. Кулагин В., Сухаревски А., Мефферт Ю. Digital@Scale: Настольная книга по цифровизации бизнеса. – М.: Интеллектуальная литература, 2019. – 293 с.
16. Абдулбариева Э.Р., Болдырев Ю.Я., Боровков А.И. и др. Высокотехнологичный компьютерный инжиниринг: обзор рынков и технологий. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. — 110 с.
17. Костюков В.Е., Соловьев В.П., Шагалиев Р.М., Гребенников А.Н. Суперкомпьютерные технологии РФЯЦ-ВНИИЭФ для гражданских отраслей промышленности // Атом. 2011. № 50-51. URL: <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/Atom-50-51-2011-2.pdf>
18. Боровков А.И., Щербина Л.А., Марусева В.М. и др. Мировая технологическая повестка и глобальные тенденции развития промышленности в условиях цифровой экономики // Инновации. 2018. № 12(242). С. 34-42. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/03_march/15/borovkov12_v2.pdf
19. Курганова Н.В., Филлин М.А., Черняев Д.С. и др. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Vol. 7. No. 5, pp. 105-115.
20. Nikulin A.N., Nikulin S.A., Zakharova I.V. Quality of aviation cluster infrastructure // Slovak International Scientific Journal. 2017. Vol. 1. No. 8, pp. 13-16.

DIGITAL TWIN TECHNOLOGY APPLICATION WHILE GAS TURBINE ENGINES DEVELOPMENT

Koval' S.N.* , Badernikov A.V. , Shmotin Yu.N., Pyatunin K.R.**

*United engine corporation (UEC),
16, Budyonny avenue, Moscow, 105118, Russia*

** e-mail: s.koval@uecrus.com*

*** e-mail: artem.badernikov@uec-saturn.ru*

Abstract

Today, industry, especially knowledge-intensive branches, is experiencing an active growth of well-deserved attention to digital technologies. In support for the Aircraft Building Development Program of the Russian Federation realization, and the strategy for the civil products in the sales and service segment the United Engine Building Corporation goes along the path of comprehensive innovations implementation while conducting research, research and development work, manufacturing and after-sale services.

Among the priorities of the innovative development of the Corporation the following areas may be highlighted:

- A concerted strategy of scientific and technical development of the industry, which defines the list of critical technologies and the trends of the corporation industrial model transformation;

- The key product programs of engine building in the trends of aviation, ground and seaborne aggregates;

- Transformational projects, which task consists in achieving the strategic goals of the Corporation, including the terms reduction for launching new products to the market.

Digital technologies allow not only the current processes automation, but also formation of the new ones with new qualities and contributing to the products of the United Engine Corporation being competitive and in demand on the world market.

For this goal achieving, accumulation of the best technologies, best resources, operating in the high-tech field such as engineering centers, startups, research teams at the Universities, and the institutes of the Russian Academy of Sciences is of utter importance. This is an ambitious task, practically proclaiming that it is important to become twice as effective to meet the customers' needs. A digital twin is a prospective trend for this problem solution.

The concept of a digital twin was proposed by Michael Grieves, a professor at the University of

Michigan, back in 2002. As he notes in his work, it was primarily called the "Mirrored Spaces Model".

The definition of a digital twin from Greaves can be found in the same place: "The digital twin is a set of virtual informational structures that fully describes potential or actual manufactured goods: from its atomic functions to geometry. Under ideal conditions, all the information that can be obtained from the product can be obtained from its digital twin".

Applying digital modelling of high-level correspondence to real test within the framework of the "digital twins" technology, as well as standardized techniques developing for mathematical models validation and analysis of the computational results will allow significantly increase the completeness of comprehension. Besides, It will increase the quality of field tests, and reduce their volume, and, in some cases, substitute them by computational substantiation based on the mathematical models validated by the results of multiple experiments. As the result, the possibility originates to reduce the time and costs of the engine certification.

Despite the fact that almost all gas turbine engine units and systems can be modeled, the accuracy of some mathematical models does not yet allow replacing the tests, but not even ensuring acceptable accuracy for making a technical decision on the design change.

Keywords: digital twin technologies, the United Engine Building Corporation (UEC) digital transformation projects, mathematical models of the gas turbine engine (GTE) life cycle stages.

References

1. Shamanskii D. *Innovatsii*, 2017, no. 11(229), pp. 6-14.
2. *Tsifrovye dvoyniki v vysokotekhnologichnoi promyshlennosti. Ekspertno-analiticheskii doklad* (Digital twins in high-tech industry: An expert and analytical report), Moscow, Infrastrukturnyi tsentr "Tekhnet" NTI, 2019, 58 p.

3. Grieves M. *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. Space Coast Press, 2011, 370 p.
4. Grieves M. Product Lifecycle Management: the new paradigm for enterprise. *International Journal of Product Development*, 2005, vol. 2(1/2), pp. 71-84.
5. Grieves M. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. LLC, 2014. URI: <https://docplayer.net/37776975-Digital-twin-manufacturing-excellence-through-virtual-factory-replication.html>
6. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Maruseva V.M. *Tsifrovoe proizvodstvo: metody, ekosistemy, tekhnologii*, MShU Skolkovo, 2018, pp. 24–44. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/04_april/12/cifrovoe-proizvodstvo-032018.pdf
7. Pyatunin K. *Korporativnyi zhurnal "Tramplin k uspekhu"*, 2020, no. 15, pp. 20-22.
8. Greenfield D. How to Get Started with the Digital Twin. *Automation World*, 2018. URL: <https://www.automationworld.com/products/software/blog/13319216/how-to-get-started-with-the-digital-twin>
9. Lu Y., Xu X. A digital twin reference model for smart manufacturing. *CIE48 Proceedings (2-5 December 2018, the University of Auckland)*. Vol. 147.
10. Sharonov A., Atnashev M., Shereikin M. et al. *Tsifrovoe Proizvodstvo: metody, ekosistemy, tekhnologii*. Rabochii doklad Departamenta korporativnogo obucheniya Moskovskoi shkoly upravleniya Skolkovo, 2017. URL: http://tpp74.ru/storage/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf
11. Bauerenhansl T., Hartlife S., Felix T. The Digital Shadow of production – A concept for the effective and efficient information supply in dynamic industrial environments. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 72, pp. 69-74. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.188
12. *Global Horizons. Final Report. United States Air Force Global Science and Technology Vision*. URL: <https://www.hsdl.org/?view&did=741377>
13. *Ob utverzhdenii Pravil predstavleniya subsidii iz federal'nogo byudzhetna na okazanie gosudarstvennoi podderzhki tsentrov Natsional'noi tekhnologicheskoi initsiativy na baze obrazovatel'nykh organizatsii vysshego obrazovaniya i nauchnykh organizatsii, i Polozheniya o provedenii konkursnogo otbora na predstavlenie grantov na gosudarstvennyu podderzhku tsentrov Natsional'noi tekhnologicheskoi initsiativy na baze obrazovatel'nykh organizatsii vysshego obrazovaniya i nauchnykh organizatsii*. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 16.10.2017 №1251* (On Approval of the Rules for Granting Subsidies from the Federal Budget for Providing State Support to National Technology Initiative Centers Based on Educational Organizations of Higher Education and Scientific Organizations and Regulations on Conducting Competitive Selection for granting grants for state support of National Technology Initiative Centers based on Educational Organizations of Higher Education and Scientific Organizations. Decree of the Russian Federation 16.10.2017 no. 1251). URL: http://www.rvc.ru/nti/centers/resolution_nti.pdf
14. Milyukov I.A., Rogalev A.N., Sokolov V.P. Approaches to design engineering and technological designing integration. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 59-70. DOI: 10.34759/vst-2020-4-59-70
15. Kulagin V., Sukharevski A., Meffert Yu. *Digital@Scale: Nastol'naya kniga po tsifrovizatsii biznesa* (Digital@Scale: a desktop book on business digitalization), Moscow, Intellektual'naya literatura, 2019, 293 p.
16. Abdulbarieva E.R., Boldyrev Yu.Ya., Borovkov A.I. et al. *Vysokotekhnologichnyi komp'yuternyi inzhiniring: obzor rynkov i tekhnologii* (High-tech computer engineering: review of markets and technologies), St. Petersburg, Izdatel'stvo Politekhnikeskogo universiteta, 2014, 110 p.
17. Kostyukov V.E., Solov'ev V.P., Shagaliev R.M., Grebennikov A.N. *Atom*, 2011, no. 50-51. URL: <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/Atom-50-51-2011-2.pdf>
18. Borovkov A.I., Shcherbina L.A., Maruseva V.M. et al. *Innovatsii*, 2018, no. 12(242), pp. 34-42. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/03_march/15/borovkov12_v2.pdf
19. Kurganova N.V., Filin M.A., Chernyaev D.S. et al. *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7, no. 5, pp. 105-115.
20. Nikulin A.N., Nikulin S.A., Zakharova I.V. Quality of aviation cluster infrastructure. *Slovak International Scientific Journal*, 2017, vol. 1, no. 8, pp. 13-16.