

Обзорная статья
УДК 629.7.01:004.94:519.876.5
DOI: [10.34759/trd-2023-128-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-21)

VR/AR В ИЗУЧЕНИИ, СОЗДАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ: ИЗ МАКРОМИРА В МИКРОМИР, ОТ НАБЛЮДЕНИЯ К ДЕЙСТВИЯМ

Александр Александрович Кабанов¹✉, Михаил Васильевич Амосов²

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», МАИ, Москва, Россия

¹drdt@mail.ru✉

²amosm@mail.ru

Аннотация. Исследование направлено на повышение эффективности процессов создания аэрокосмической техники и образовательной деятельности с использованием цифровых технологий VR/AR в аэрокосмической промышленности. Для этого выполнен обзор прикладных примеров применения VR/AR по схеме: процесс, объект, этап жизненного цикла объекта, масштаб среды и объекта, цели, задачи, методы, технологии, программное и аппаратное обеспечение. Проведен их критический анализ. По результатам анализа установлено, что преимущественной областью применения VR/AR в аэрокосмической отрасли в части создания техники является наземная отработка процессов сборки и монтажа крупногабаритных объектов, а также их эксплуатации в условиях космического пространства на макроуровне. Показано, что при этом в виртуальном или дополненном пространстве

оператор выступает непосредственно в роли человека-эксплуатанта объекта. Показано, что отработка и исследование процессов на микроуровне, например, при конструкторско-технологическом проектировании изделий, получили меньшее распространение и являются той областью, где VR/AR использованы не в полной мере и имеют существенный потенциал. Продемонстрировано, что в этом случае оператор в виртуальном или дополненном пространстве должен выступать в качестве наблюдателя и/или активного агента и являться частью конструкции или среды эксплуатации. Для реализации этого предложено использовать методы и приемы теории решения изобретательских задач как методической основы, а для инструментальной поддержки – существующие инструменты численного моделирования физико-химических процессов с их соответствующей доработкой. В части образовательной деятельности выявлено, что основным препятствием внедрения VR/AR является необходимость в дорогостоящей инфраструктуре: лабораториях и оборудовании. Предложены методические рекомендации и их поддержка программными и аппаратными средствами, предоставляющие возможность реализации VR/AR в независимой самостоятельной исследовательской работе студента с использованием средств индивидуального пользования.

Ключевые слова: цифровые технологии, VR, AR, аэрокосмическая техника, технологии виртуальной и дополненной реальности, проектирование, эксплуатация, теория решения изобретательских задач

Для цитирования: Кабанов А.А., Амосов М.В. VR/AR в изучении, создании и эксплуатации аэрокосмической техники: из макромира в микромир, от наблюдения к действиям // Труды МАИ. 2023. № 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-21)

Original article

VR/AR IN THE STUDY, CREATION AND OPERATION OF AEROSPACE TECHNOLOGY: FROM MACROLEVEL TO MICROLEVEL, FROM OBSERVATION TO ACTIVITY

Aleksandr A. Kabanov¹✉, Mikhail V. Amosov²

^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

¹drdt@mail.ru✉

²amosm@mail.ru

Abstract. The study is aimed at the efficiency improving of the processes of creating aerospace technology and educational activities with digital VR/AR technologies in the aerospace industry. For this purpose, a review of applied examples of the VR/AR employing was performed according to the scheme: process, object, stage of the object's life cycle, scale of the environment and object, goals, tasks, methods, technologies, software and hardware, and their critical analysis. Analysis of the results revealed that the predominant area of the VR/AR application in the aerospace industry was the ground-based work-out of the assembling and mounting process of the bulky objects, as well as their operation under space conditions on the macro-level. The article demonstrates herewith that in virtual or augmented space the operator performs directly the role of the object human operator. It shows as well that processes working-out and studying at the macro-level, such as while the

structural-technological design of products, acquire less spread, and they are the area where VR/AR are not employed to the full extent and possess substantial potential. The authors demonstrate that in this case operator in both virtual and augmented space should be an active observer and/or be a part of the structure or operation media. To realize this, the authors propose employing methods and techniques of the theory of inventive problem solving as the methodological foundation, and existing numerical modeling tools for physico-chemical processes with their appropriate adaptation as the instrumental support. With regard to the educational activities, it was revealed that the main obstacle to the VR/AR implementation was the necessity for the costly infrastructure, namely laboratories and equipment. The authors suggested methodological recommendations and their software and hardware support, offering an opportunity for the AR/VR realization in the independent self-sufficient research work of the student employing the means of individual use.

Keywords: Digital technologies, VR, AR, aerospace engineering, virtual and augmented reality technologies, design, operation, theory of inventive problem solving

For citation: Kabanov A.A., Amosov M.V. VR/AR in the study, creation and operation of aerospace technology: from macrolevel to microlevel, from observation to activity. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-21)

1. Введение

Среди технологий цифрового моделирования и цифровых двойников технологии виртуальной и дополненной реальности (далее, VR/AR) занимают одну

из ключевых позиций¹. Суть технологий заключается в помещении пользователя-оператора в виртуальную (VR) или дополненную виртуальными объектами физическую среду (AR) с организацией интерактивного взаимодействия с ней посредством органов чувств человека с помощью аппаратных периферийных устройств и специального программного обеспечения. Указанные технологии используются и в аэрокосмической отрасли [1], особенно в применении к системам, условия эксплуатации которых существенно отличаются от земных. Действительно, трудно представить лучшее средство получения рефлексивного опыта напрямую самим человеком (не через модель) как обратной связи при решении исследовательских и проектных задач. Этот факт является ключевым отличием VR/AR от других цифровых технологий. Однако, несмотря на очевидное преимущество, широкое распространение VR/AR в рассматриваемой области все еще ограничено [2]. Данное исследование направлено на выявление таких ограничений, а также на расширение сферы применения VR/AR за счет использования ключевых преимуществ технологий. Конечной целью исследования является повышение эффективности процессов создания аэрокосмической техники и образовательной деятельности для как можно более широкого круга специалистов профильных предприятий и студентов высших аэрокосмических учебных заведений.

¹ Источник: Smart manufacturing experience. Connect. Explore. Advance. A Must-Attend Smart Technology Experience <https://www.smartmanufacturingexperience.com/attend/why-attend/>

2. Материалы и методы

Выявление потенциальных направлений выполнено на основе изучения и анализа существующего опыта использования VR/AR. Опыт представлен материалами из области аэрокосмического машиностроения и образования по следующим источникам информации:

- Научно-техническая информация (научные статьи, патенты, свидетельства на ЭВМ и др.)
- Продукты и услуги
- Проекты

Систематизация прикладных примеров выполнена по областям применения и полученным результатам, по роли наблюдателя в исследуемой системе, степени масштабирования исследуемой системы (микроуровень, без масштабирования, макроуровень), по используемым технологиям и обеспечению.

Полный перечень атрибутов анализируемых признаков представлен ниже:

- Область применения
- Цели и задачи, результат
- Процессы применения / наблюдения
- Объект наблюдения по уровням укрупнения (система, агрегат, узел, деталь)
- Форм-фактор исследуемого объекта (размерность объекта)
- Этап жизненного цикла объекта
- Масштаб среды наблюдения / наблюдателя
- Используемые сопутствующие методы, технологии

- Программное и аппаратное обеспечение

Для альтернативных областей применения VR/AR, в качестве методической основы разработки аппаратных средств и программного обеспечения, предлагается использование методов теории решения изобретательских задач (ТРИЗ), а именно оператора РВС (размер-время-стоимость), эвристических приемов построения ментальных моделей. Существо приема РВС заключается в искусственном масштабировании системы по экстремальным значениям параметров размера, времени, стоимости с целью исследования поведения системы. Существо эвристических приемов состоит в замене исследуемой системы системой связанных простых конструкций-абстракций для лучшего понимания принципов работы устройств [3].

В ближайшем будущем, в соответствии с законами развития технических систем [3, 4], можно с большой степенью достоверности спрогнозировать, что технологии VR/AR все больше будут использоваться для изучения процессов на микроуровне. Отчасти эти процессы уже происходят сегодня и в аэрокосмической отрасли. Так, для решения задач в космическом пространстве, все больше используются миниатюрные космические аппараты. Т.е. выполняется переход от механических технических систем к мехатронным, электронным, квантовым. Однако VR/AR сегодня ориентированы именно на механические системы на макроуровне и на исследование процессов, описываемых законами классической ньютоновской механики. Далее будет показано, каким образом возможно расширить область

эффективного использования VR/AR для исследования систем с принципами действия, отличных от механических.

3. Результаты

Результаты исследования прикладного применения VR/AR основаны на анализе работ более 100 источников по указанным ранее признакам. В ходе обобщения анализируемых работ были выделены следующие направления: область применения, форм-фактор среды и объекта наблюдения, роль оператора в исследуемой системе, сопутствующие технологии и обеспечение. Сводные результаты с наиболее релевантными источниками с кратким их описанием в качестве примеров приведены в табл. 1-3. По результатам обработки данных таблиц построены гистограммы, приведенные на рис.1, на основании которых сделаны выводы по опыту и перспективах использования VR/AR для повышения эффективности процессов создания аэрокосмической техники.

3.1 Область применения

Работы по направлению «область применения» анализировались с точки зрения целей применения VR/AR, основным задачам для достижения целей, полученному результату. Для иллюстрации подходов в рамках этого анализа в табл. 1 приведены наиболее характерные примеры для аэрокосмической отрасли.

Таблица 1. Систематизация прикладных примеров применения VR/AR в аэрокосмической отрасли в разрезе областей применения, целей, задач и результатов

Варианты применения ¹	Область применения	Цели	Задачи	Результат
1.1. Обучение студентов образовательных учреждений [5,6], а также [7]	Образование	Повышение эффективности подготовки специалистов в области создания и эксплуатации РКТ	1. Обучение средствам создания виртуальных сред 2. Обучение в области разработки тренажеров	Создание иммерсивных сред, позволяющих оценивать эффективность решений
1.2. Отработка маневров уклонения от космического мусора ² , моделирование движения КА [8]	Управление космическими полетами, образование	Повышение эффективности управления КА	1. Разработка модели космического пространства 2. Разработка программной среды, моделирующей механику полета космических объектов 3. Предсказание траекторий уклонения от космического мусора, движения КА и др.	Имитация траекторий КА, близких к реальным
1.3. Изучение наноразмерных объектов ³	Материаловедение, образование	Реализация обучающего лабораторного практикума в VR-среде как альтернативы дорогостоящему физическому оборудованию	1. Разработка образовательного тренажера по анализу наноматериалов в просвечивающем электронном микроскопе 2. Разработка методики исследования в виртуальной среде	Имитация реалистичных условий наблюдения поведения материалов на наноуровне
2.1. Отработка движений в условиях пониженной гравитации ⁴ , а также подготовка космонавтов [10-21]	Подготовка космонавтов	Повышение эффективности тренировок космонавтов	1. Разработка тренажера (стенда), имитирующего пониженную гравитацию 2. Разработка 3D-сцен окружения стенда, имитирующих космическое пространство, местность на поверхности планет и др. 3. Интеграция стенда и VR	Имитация реалистичных условий пребывания в космическом пространстве, на орбитальных станциях, планетах
2.2. VR тренажер для тренировки пилотов и летчиков ⁵ [22-24]	Подготовка пилотов и лётчиков	Повышение эффективности подготовки пилотов и лётчиков	1. Разработка эмуляторов среды и системы управления 2. Разработка компонентов аппаратной части: дисплеи, манипуляторы, устройства обратной связи и др.	Повышение эффективности тренировки со снижением затрат на подготовку летного состава
3. Использование VR в обучении проектированию ⁶ [9], а также [25-35]	Образование, проектирование	Повышение эффективности процессов обучения проектированию РКТ	1. Разработка 3D-моделей конструкции объекта 2. Исследование конструкции с использованием VR	Получение опыта преимущественно в части согласования взаимного расположения конструкций и эргономики
4. Планирование процессов сборки и технического обслуживания [9], а также ⁷ [36-38]	Производство, служба эксплуатации, образование	Повышение эффективности обучения процессам сборки ремонта и обслуживания	1. Реализация перемещений в VR среде естественным образом 2. Реализация тактильной обратной связи	Имитация реалистичных операций сборки

Варианты применения ¹	Область применения	Цели	Задачи	Результат
5.1. Отработка практических навыков технического обслуживания и ремонта ЛА [39-42]	Служба эксплуатации, образование	Повышение эффективности обучения процессам технического обслуживания и ремонта	1. Разработка 3D-модели системы и ее натурного макета 2. Интеграция 3D-модели системы и натурного макета в VR/AR	Имитация реалистичных процессов обслуживания
5.2. Мониторинг состояния компонентов авиационных двигателей [43]	Служба эксплуатации авиационных двигателей	Реализация иммерсивной среды для сравнения характеристик различных двигателей, оценки технического состояния двигателей	1. Разработка 3D-модели двигателя 2. Оцифровка потока среды в двигателе путем обработки данных датчиков 3. Построение регрессионных моделей двигателя для оценки отклонений в техническом состоянии двигателя	Имитация реалистичных условий наблюдения аэротермодинамических потоков в двигателе

¹ Наиболее релевантный пример, и близкие к нему для области применения.

² Источник: Виртуальная/дополненная реальность и искусственный интеллект. 2022.

<https://priem.mai.ru/master/programs/item/?id=103770&referer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

³ Источник: В Центре НТИ МГТУ им. Баумана создадут VR-лабораторию для изучения наноразмерных объектов. 2022. <https://mediavid.ru/2022/08/03/sozdadut-vr-laboratoriyu/>

⁴ Источник: В МАИ создали VR-тренажёр для отработки полётов на Луну. МАИ. 2022. <https://mai.ru/press/news/detail.php? ID=167611>

⁵ Источник: Vrgineers announces development of Virtual and Mixed Reality pilot training system in partnership with Lockheed Martin. 2022. <https://www.auganix.org/vrgineers-announces-development-of-virtual-and-mixed-reality-pilot-training-system-in-partnership-with-lockheed-martin/>

⁶ Источник: Программно-аппаратный комплекс виртуального окружения (CAVE 3D) https://research.spbstu.ru/scientific-projects/computer_aided_virtual_enviroment_system/?ysclid=lc9014vokv417232938

⁷ Источник: Soaring through virtual aviation: The role of VR in aerospace manufacturing. 2020.

<https://manufacturingdigital.com/technology/soaring-through-virtual-aviation-role-vr-aerospace-manufacturing>

3.2 Масштаб среды наблюдения, роль наблюдателя в исследуемой системе, этап жизненного цикла объекта

В части масштабирования в разрезе исследуемых с помощью VR/AR процессов анализировались форм-фактор и степень укрупнения объекта исследования, масштаб среды наблюдения и оператора, а также роль оператора при работе в виртуальной или дополненной среде.

Таблица 2. Систематизация прикладных примеров применения VR/AR в аэрокосмической отрасли в разрезе процессов, объектов наблюдения и масштабах их представления

Варианты применения	Процессы применения / наблюдения	Объект ¹	Форм-фактор объекта, м	Этап жизненного цикла объекта	Масштаб среды наблюдения и оператора ²	Роль оператора в процессе ³
1.1. Мониторинг состояния компонентов авиационных двигателей [43]	Техническое обслуживание и ремонт / аэротермодинамические	Агрегат	10 ⁻² -10 ¹	Эксплуатация	Без масштабирования, микроуровень	Сторонний наблюдатель
1.2. Изучение наноразмерных объектов ⁴	Физические процессы	Материал	10 ⁻⁹	-	Наноуровень	Сторонний наблюдатель
2.1. Обучение в ходе проектной деятельности [9,25-35]	Разработка, подготовка производства	Агрегат	1-10 ¹	Проектирование подготовка производства	Без масштабирования	Сторонний наблюдатель
2.2. Обучение, инструктаж процессам производства, обслуживания [9], а также [36-38]	Техническое обслуживание и ремонт / сборочно-монтажные	Агрегат	1-10 ¹	Подготовка производства, производство Эксплуатация	Без масштабирования	Исполнитель
3. Отработка практических навыков технического обслуживания и ремонта ЛА ⁵ [39-42]	Техническое обслуживание и ремонт / сборочно-монтажные	Система, агрегат	1	Эксплуатация	Без масштабирования	Исполнитель
4.1. Отработка маневров уклонения от космического мусора, моделирование движения КА [8]	Управление полетом КА / динамика КА	КА	1-10 ²	Эксплуатация	Без масштабирования	Сторонний наблюдатель
4.2. Отработка движений в условиях пониженной гравитации [11,14,15,18]	Тренировочные	Планета (участок), КА, космическое пространство	1-10 ²	Подготовка космической миссии	Без масштабирования	Исполнитель

¹ Объект наблюдения в соответствии с уровнем укрупнения (система, агрегат, узел, деталь и др.).

² Масштаб среды наблюдения и оператора в ней: микроуровень, без масштабирования, макроуровень.

³ Роль оператора в процессе исследования: исполнитель (человек), сторонний наблюдатель, элемент (часть) среды наблюдения, элемент (часть) объекта наблюдения.

⁴ Источник: В Центре НТИ МГТУ им. Баумана создадут VR-лабораторию для изучения наноразмерных объектов. 2022. <https://mediavid.ru/2022/08/03/sozdadut-vr-laboratoriyu/>

⁵ Источник: МАИ представил учебный VR/AR-тренажёр по обслуживанию и ремонту авиатехники. Авиация России. 2022. <https://aviation21.ru/mai-predstavil-uchebnyj-vr-ar-trenazhyor-po-obslyuzhivaniyu-i-remontu-aviatexniki/>

3.3 Технологии и обеспечение

Для этого направления внимание обращалось на использование сопутствующих технологий в VR/AR. Результаты отображены в табл. 3.

Таблица 3. Систематизация прикладных примеров применения VR/AR в аэрокосмической отрасли в разрезе методов, технологий, аппаратного и программного обеспечения

Варианты применения	Методы	Технологии ¹	Аппаратное обеспечение	Программное обеспечение
1. Отработка практических навыков технического обслуживания и ремонта ЛА ² , а также [39-42]	Оптический метод отслеживания рук, метод позиционирования через ИК-канал	CAD, 3D-печать	ПК, шлем, коммутационный модуль, контроллеры, перчатки VR, стенд	Специальное ПО
2. Отработка движений в условиях пониженной гравитации ³ , а также [11,14,15,18]	Методы имитационного моделирования космического пространства	CAD, CAE, система электронного позиционирования пользователя	ПК, тренажер (стенд), контроллеры, VR-очки	Специальное ПО: программный комплекс виртуальной реальности
3. Обучение, инструктаж процессам производства, обслуживания [9], а также [36-42]	Методы имитационного моделирования физических процессов	CAD, CAE, тактильная обратная связь	ПК, перчатки VR	Специальное ПО: симулятор движения оператора
4. Изучение наноразмерных объектов [17]	Методы имитационного моделирования физических процессов	CAD, CAE	ПК	Специальное ПО
5. Анализ геометрических моделей промышленных изделий ⁴	Методы имитационного моделирования физических процессов	CAD, CAE, CAVE 3D	Оптическая трекинг система, проекционно-экранное оборудование, шлем, кластер вычислительный	Специальное ПО
6. Отработка маневров уклонения от космического мусора, моделирование движения КА [8]	Методы имитационного моделирования космических полетов, методы машинного обучения	CAD, CAE, ML	ПК, шлем	Специальное ПО
7. Мониторинг состояния компонентов авиационных двигателей [35,43]	Методы имитационного моделирования аэротермодинамических потоков, методы вычислительной статистики, методы машинного обучения	CAD, CAE, ML	ПК, стенд, датчики	Специальное ПО
8. Распознавание объектов на основе видеопотока информации [44]	Методы определения формы объемных объектов по данным, полученным из видеоряда камеры	Компьютерное зрение	Видеокамера	Специальное ПО

¹ Указаны сопутствующие технологии.

² Источник: МАИ представил учебный VR/AR-тренажёр по обслуживанию и ремонту авиатехники. Авиация России. 2022. <https://aviation21.ru/mai-predstavil-uchebnyj-vr-ar-trenazhyor-po-obluzhivaniyu-i-remontu-aviatexniki/>

³ Источник: В МАИ создали VR-тренажёр для отработки полётов на Луну. МАИ. 2022. <https://mai.ru/press/news/detail.php?ID=167611>

⁴ Источник: Программно-аппаратный комплекс виртуального окружения (CAVE 3D) https://research.spbstu.ru/scientific-projects/computer_aided_virtual_enviroment_system/?ysclid=lc9014vokv417232938

3.4 Результаты анализа опыта применения VR/AR

Как видно из таблиц, наиболее распространенной областью использования VR/AR является обучение операторов навыкам, необходимым на этапах производства и эксплуатации жизненного цикла целевого объекта. Эти связи показаны на рис. 1а стрелками от области применения «образование» к соответствующим областям этапов жизненного цикла объекта. В области проектирования преимущественно прорабатываются вопросы эргономики изделий.

Большинство задач с использованием технологии виртуальной реальности в аэрокосмической отрасли решаются на уровне масштабирования 1:1, рис. 1б. Меньше же всего применений на микро- и макроуровнях. Использование технологии в основном направлено на создание и визуализацию цифровых двойников – моделей разрабатываемых объектов или процессов, с которыми человек связан непосредственным взаимодействием.

Что касается применения сопутствующих технологий, то VR/AR пока остается только средством наблюдения процессов, хотя появляются примеры внедрения элементов предиктивного анализа с использованием искусственного интеллекта, рис. 1в. При этом обработке подлежит графическая информация (изображение или поток видеoinформации), на основе результатов которой выдаются рекомендации по целевому изменению системы.

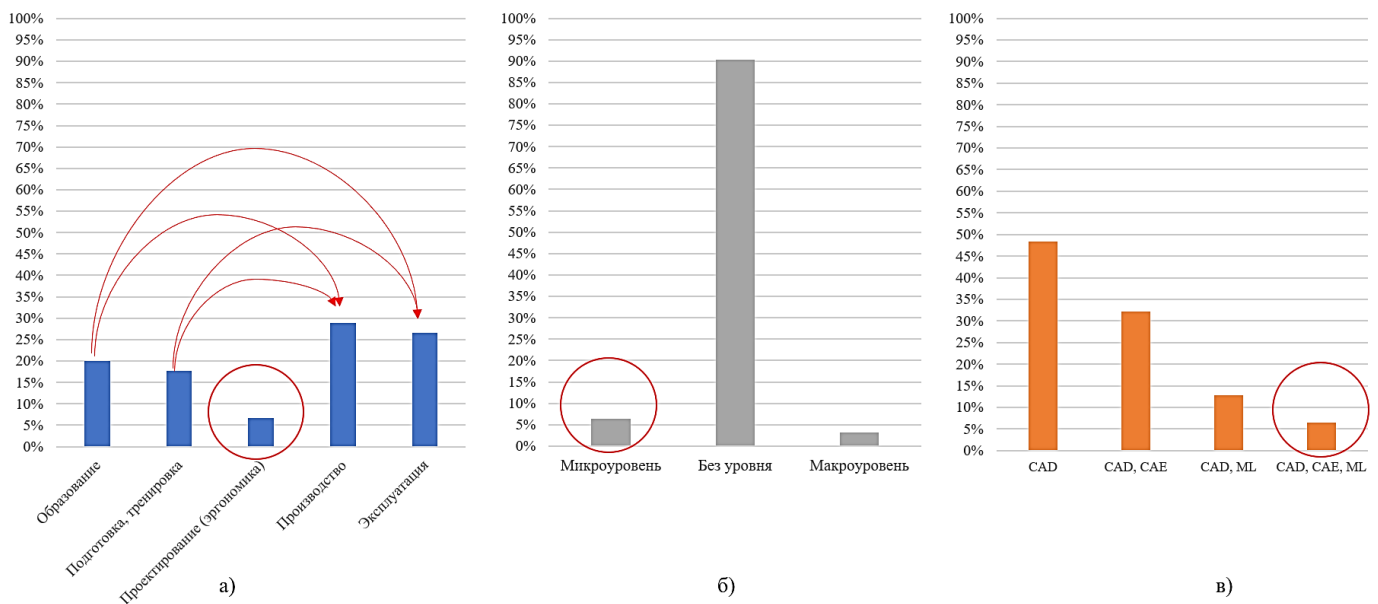


Рис. 1. Относительное количество релевантных примеров использования VR/AR: а) по области применения; б) по геометрическому масштабу среды исследования; в) по сопутствующим технологиям, применяемым совместно с VR/AR

4 Анализ и предложения по результатам исследования

4.1 Анализ результатов исследования показал, что ландшафт использования VR/AR технологий в аэрокосмической отрасли имеет следующую конфигурацию.

4.1.1. Наиболее интенсивно VR/AR технологии сегодня применяются для решения следующих задач:

- обучение операторов-проектантов, конструкторов в основном для решения задач эргономики – этап проектирования, процессы эксплуатации;
- обучение операторов-технологов, специалистов по производству, производственных рабочих для решения задач технологической подготовки производства, производства – этап испытаний, производства технологические процессы изготовления и испытания систем и изделий;

- обучение операторов-эксплуатантов промышленных объектов для решения задач эксплуатации установок и объектов – этап эксплуатации; процессы эксплуатации.

Выделены следующие особенности применения VR/AR:

- человек в VR/AR выступает в роли оператора-человека;
- масштаб среды применения VR/AR не отличается от реального пространства;
- преимущественно моделируется только геометрическая составляющая пространства;
- в основном используются для крупных систем и крупногабаритных объектов (заводы, станции, ремонтные базы и др.).

4.1.2. Наибольшее распространение и освоение получили следующие технологии VR/AR:

- технологии – технологии увеличительных линз, технологии позиционирования шлема и контроллеров в пространстве;
- аппаратное обеспечение – ПК, вычислительные кластеры; периферийные устройства (шлемы виртуальной реальности с контроллерами, очки дополненной реальности);
- программное обеспечение – по большей части ПО, поддерживающее следующие геометрические форматы данных: 3D форматы (3DS, OBJ, DAE, FLT, FBX, glTF 2.0); CAD форматы (JT, 3DM, X_T, 3DXML, STEP, IGES, BREP); BIM форматы (IFC, DWG, DGN, SAT, DFX, DWF); облако точек PCL, XYZ, PTS.

С методической точки зрения в качестве основных компонентов VR/AR выступают модель среды исследуемого объекта; модель объекта (чаще всего имеют геометрическую природу и реализуются средствами CAD-систем); периферийные устройства взаимодействия оператора с виртуальной средой; персональный компьютер или мобильное устройство для обработки информации и вычислений; и сам оператор. Компоненты VR/AR-технологий в наиболее часто используемой в настоящее время конфигурации показаны на рис. 2.



Рис. 2. Компоненты VR/AR-технологий в наиболее часто используемой в настоящее время конфигурации

4.1.3. Наименьшее распространение VR/AR получили в исследованиях процессов на макро и микроуровнях, при которых человек-оператор может выступать в качестве наблюдателя в исследуемой системе со следующим масштабированием пространства:

- в пространстве в масштабах макроуровня – при изучении крупномасштабных объектов;

- в пространстве в масштабах микроуровня – при изучении микромиров и процессов в них происходящих – конструкторско-технологическая отработка процессов изготовления изделий, процессов эксплуатации изделий (работа под нагрузкой, работа при обтекании газообразных и жидких сред, трансляция электрических сигналов и др.).

Однако, именно в этих областях скрыт наибольший потенциал использования VR/AR, поскольку гораздо шире сфера применения, т.к. не ограничена только объектами, непосредственно взаимодействующими с человеком.

4.1.4 Массовому внедрению VR/AR препятствуют следующие факторы:

- стоимость оборудования. На данный момент стоимость одного комплекта шлема виртуальной реальности оценивается в 120-150 тыс. руб. Кроме того, необходим компьютер повышенной производительности, ценовой диапазон 150-200 тыс. руб. Если брать в расчет технологии CAVE – стоимость на порядок выше. В еще большей ценовой категории тренажерное оборудование. Как следствие, VR/AR получили распространение только в рамках специальных лабораторий. А в качестве альтернативы в учебном процессе используются тренажерные имитаторы [2].
- повышение VR/AR квалификации инженеров и преподавателей. Требуются квалифицированные кадры, которые смогут освоить технологию виртуальной реальности и адаптировать ее под требуемые инженерные задачи или под учебный процесс.

- биологические факторы. Длительное использование технологий виртуальной реальности у неподготовленного человека вызывают физический дискомфорт, воздействие на человека до конца не изучено.
- технология ограничена производительностью компьютера. Для решения задач промышленности характерен большой объем графической информации, только для рендеринга которой производительности средних устройств недостаточно, не говоря уже о дополнительной обработке при решении задач предиктивного анализа.

4.2. Предложения по результатам исследования

4.2.1 Направления расширения вариантов использования VR/AR

На основании выполненного анализа, с учетом современных факторов в области развития техники (переход техники от механических систем к мехатронным, переход от традиционного анализа поведения систем к их предиктивному управлению) сформированы следующие направления расширения вариантов использования VR/AR:

- расширение области применения за счет массового внедрения технологии на более ранних этапах жизненного цикла разрабатываемых систем: переход от эксплуатации к разработке (проектирование, конструирование);
- расширение роли оператора за счет получения возможности воздействия на систему: от наблюдателя к активному участнику процесса;

- расширение степени проникновения в область исследования путем управления уровнем масштабирования исследуемой системы: от реального пространства к микроуровню и к макроуровню.
- расширение возможностей по целевому управлению исследуемой системой: переход от наблюдения к предиктивному анализу на основе алгоритмов машинного обучения.

Переход в микромир позволит также расширить область применения, а именно получить более широкие возможности в проектной деятельности, прежде всего в процессах конструкторско-технологической отработки аэрокосмической техники (не только эргономика и не только сборка компонентов, как для традиционных VR/AR). А в производственной деятельности – выйти за рамки сборочно-монтажных процессов и работать в заготовительных и деталелательных переделах производства.

Переход от оператора-наблюдателя к оператору-участнику процесса, в том числе на микро/макроуровнях позволит повысить качество и эффективность процессов разработки за счет более глубокого понимания процессов, прежде всего физико-химических, электромагнитных взаимодействий (не только геометрическая составляющая как в традиционных VR/AR). Кроме этого, позволит осуществить целенаправленное изменение целевого объекта и его поведения (не только наблюдение, как в традиционных VR/AR) процессов.

4.2.2 Методическая основа расширения вариантов использования VR/AR

Разработка методической основы расширения вариантов использования VR/AR выполнялась путем адаптации наиболее распространенной конфигурации VR/AR с учетом накопленного опыта и задела в использовании. Для этого схема рис. 2 доработана до конфигурации, представленной на рис. 3. Помимо уже указанных ранее для традиционной конфигурации моделей среды и объекта, в нее добавлены модель процесса, а также модель оператора. В этой конфигурации модель среды и объекта должны быть дополнены формальным описанием физической составляющей, соответствующей моделируемому процессу. В настоящее время эти модели разработаны, с успехом используются для разных дисциплин инженерных предметных областей и программно реализованы в CAE-системах.

Оператор в исследуемом процессе может моделироваться частью системы как наблюдатель, как активный ее элемент – агент, либо как комбинация этих ролей в разные моменты времени. Примером этого может служить внедрение оператора в модель материала при расчетах напряженно-деформированного состояния конструкции или в модель среды при выполнении аэродинамических расчетов. Оператор может быть представлен в виде независимой модели по отношению к указанным моделям среды и объекта.



Рис. 3. Адаптация VR/AR-технологий для расширения возможностей в области проектирования на микроуровне

На рис. 4 представлено два варианта адаптации VR/AR. Простейший случай требует разработки модуля постпроцессора визуализации на микроуровне и его интеграции с существующими CAE-системами, рис. 4а. При этом открывается возможность включения оператора в наблюдение за исследуемой системой на микроуровне. Такая адаптация потребует минимальных усилий.

Для внедрения активного агента-оператора как части исследуемой системы, способного взаимодействовать с нею, потребуется разработка дополнительных модулей и их интеграция для всех блоков CAE-системы. На рис. 4б цифрами показаны точки входа интеграции дополнительных модулей.

Реализация модели оператора может быть осуществлена с использованием агентного подхода, активно применяемого в настоящее время для разработки

детальных моделей с множеством активных объектов исследуемой системы. Поведение таких объектов может быть формализовано с помощью UML.

Методическим подспорьем при разработке агентной модели может стать известная из теории решения изобретательских задач техники инженерного творчества. Оказавшись одним из таких элементов, моделирующих поведение технической системы, специалист сможет более глубоко анализировать взаимодействие между разными микроэлементами системы, понять, как происходят те или иные физические процессы, освоить не только геометрические формы системы, но и микропроцессы, на которых основана система. Виртуальная реальность в данном случае предоставит эффект присутствия, что позволит понять физические процессы на интерактивном уровне, физически взаимодействуя с элементами системы. По сути, этот прием является ментальной альтернативой VR/AR.

Дополнительно, также из ТРИЗа, для понимания процессов могут быть использованы вепольный и функциональный анализ. Для целенаправленного активного воздействия на систему, а также для разработки потенциальных проектных решений – база физических эффектов и комбинаторный синтез.

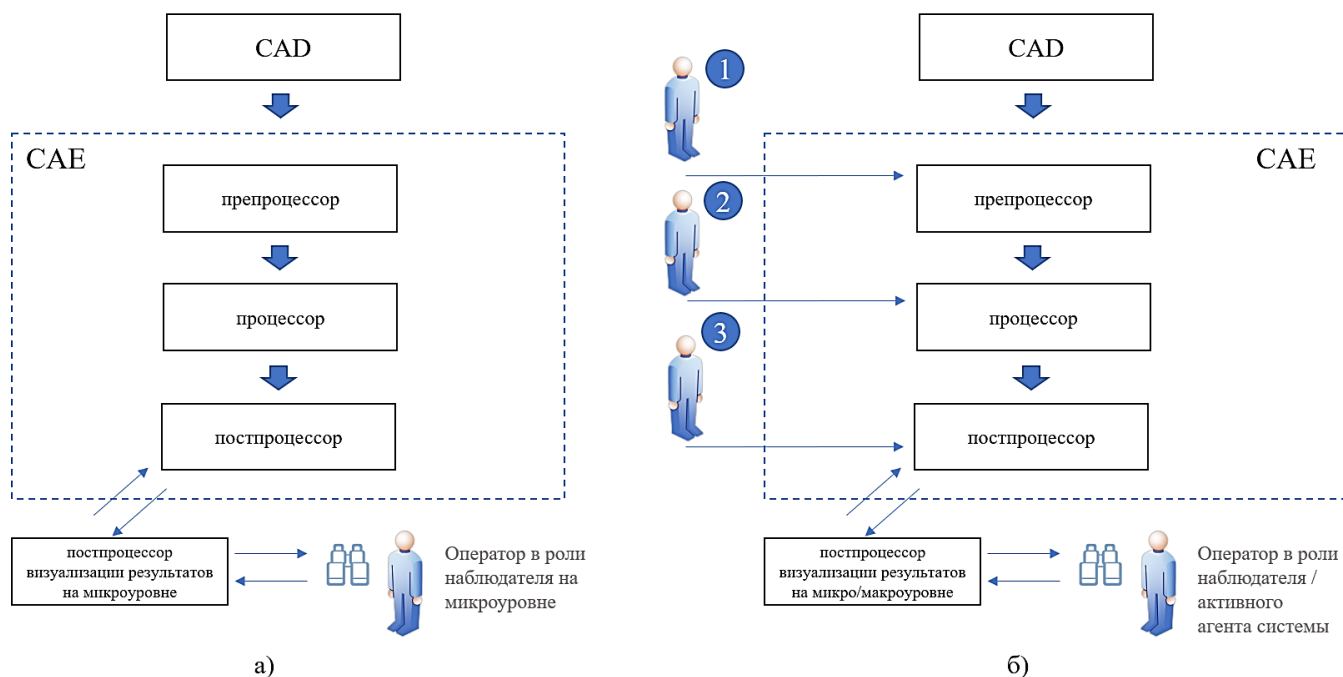


Рис. 4. Варианты адаптации VR/AR для наблюдения за процессами на микроуровне (а) и активного воздействия на систему с синхронным наблюдением в ходе ее исследования (б)

4.2.3 Предложения по массовому внедрению VR/AR в отрасли, в том числе, в образовательном процессе

Предложения по массовому внедрению VR/AR в аэрокосмической отрасли относятся к использованию VR/AR в повседневной работе инженера-конструктора, технолога, испытателя, а также студентов, магистрантов, аспирантов ВУЗов.

В первую очередь, для применения технологии виртуальной реальности необходим шлем виртуальной реальности. В настоящее время в распоряжении имеется широкий ряд периферийных устройств разных производителей: продукция компаний Meta, HTC (Vive), Pico; Pimax; система Valve Index; шлем Nolo Sonic; системы VR от Varjo; Microsoft HoloLens 2; устройства Vuzix, Realwear HMT и Navigator 500; Google Glass 2.0.

Кроме того, необходим персональный компьютер. Минимальные и рекомендуемые характеристики указаны в табл. 4. Для сравнения в табл.4 также приведен «офисный» ПК.

Таблица 4. Минимальные и рекомендуемые характеристики ПК для VR/AR

Наименование конфигурации ПК	Аппаратная часть	Характеристика аппаратной части
Рекомендуемый для VR ПК	Процессор AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor	Число ядер: ЦП 6 Число потоков: 12 Базовая частота: 3.6GHz
	Видеокарта AMD Radeon RX 5700 XT	VRAM:8000MB Тип памяти: GDDR6 Базовая частота: 1755 MHz Разгонная частота: до 1905 MHz Пиковая производительность вычислений с половинной точностью: 19.51 TFLOPs
	Оперативная память	24000MB RAM DDR3
	Память	250-1000GB SSD
ПК с минимальными требованиями для VR	Процессор Intel Core i5	Число ядер: ЦП 6 Число потоков: 6 Базовая частота: 3.00 GHz
	Видеокарта GeForce 1650	VRAM:4000MB Тип памяти: GDDR5 Базовая частота: 1485 MHz Разгонная частота: до 1665 MHz Пиковая производительность вычислений с половинной точностью: 5.967 TFLOPs
	Оперативная память	8000MB RAM DDR3
	Память	250GB SSD
«Офисный» ПК	Процессор Intel Core i3	Число ядер: ЦП 2 Число потоков: 4 Базовая частота: 2.10 GHz
	Видеокарта GeForce GTX 950	VRAM: 2048MB Тип памяти: GDDR5 Базовая частота: 1024 MHz Разгонная частота: до 1188 MHz Пиковая производительность вычислений с половинной точностью: 1.828 TFLOPs
	Оперативная память	4000MB RAM DDR2
	Память	250GB HDD

Как уже указывалось, затраты на начальный профессиональный комплект оборудования для работы с VR/AR составят около 270-350 тыс. руб. и выше.

После тестирования даны предложения по наиболее доступной конфигурации оборудования для VR/AR в части периферийных устройств и ПК, прежде всего для наиболее ограниченной в финансовых возможностях категории пользователей – студентов ВУЗов. Бюджетная конфигурация периферийных устройств VR/AR, приведенная на рис.5а, оценивается в 30 тыс. руб. ПК в комплект – также в 40 тыс. руб., на рис.5б видно, что ПК с минимальными требованиями к основным техническим характеристикам для работы с VR/AR незначительно отличается от офисного ПК. Итого 70 тыс. руб., что примерно в 4 раза меньше начальной профессиональной конфигурации.

В части программного обеспечения доступны свободно распространяемые версии CAD и CAE систем или их академические версии в случае пользователей студентов. Специальные дополнительные модули могут быть реализованы на высокоуровневых языках программирования Python, Java, C++ и др.

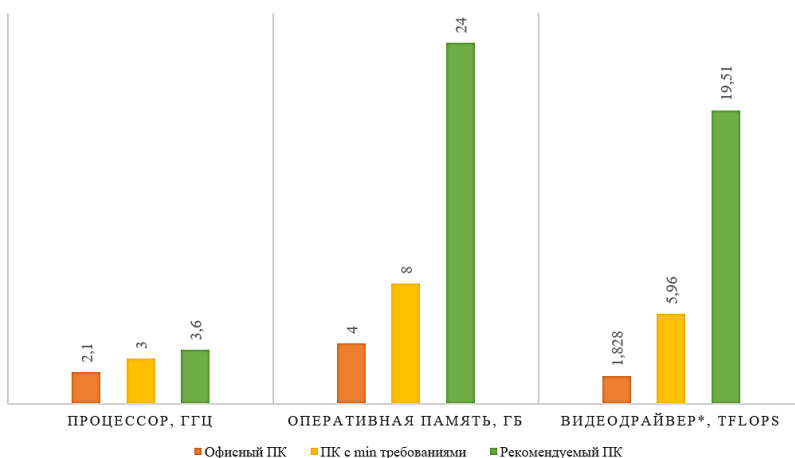


• Очки / шлем

- Разрешение: 1832 x 1920 на глаз (3664 x 1920 в целом)
- Процессор: Qualcomm Snapdragon XR2
- RAM: 6000 MB
- Тип матрицы экрана: LCD
- FOV: 90°
- Частота обновления экрана: 120 Hz
- Память: 128 - 256 GB
- Время работы батареи: 2-3 часа



• Персональный компьютер



а)

б)

Рис. 5. Предложения по комплекту аппаратной части VR/AR в наиболее доступной конфигурации: а) периферийные устройства, б) персональный компьютер (в сравнении)

5. Выводы

Работа направлена на исследование технологий виртуальной и дополненной реальности в аэрокосмической отрасли, выявление сфер, применение в которых наименее исследовано и наиболее перспективно. В работе выполнен анализ примеров применений технологий VR/AR в аэрокосмической отрасли.

Показано, что существенные резервы в повышении эффективности процессов сосредоточены в поддержке VR/AR процессов конструкторско-технологического проектирования на макро и микроуровнях. Т.к. обоснованность и корректность того или иного проектного решения существенно зависит от качества понимания процессов функционирования систем.

Показана возможность использования VR/AR для целенаправленного управления исследуемыми системами и синтеза проектных решений в поддержку разрабатываемых систем при реализации оператора как составной активной части иммерсивной среды на микроуровне (часть конструкции, часть внешней среды и т.д.).

Предложено альтернативное использование VR/AR при разработке конструкций ЛА, а также при их конструкторско-технологической отработке. Предложены подходы, позволяющие осуществить переход к массовому использованию VR/AR, в том числе в образовательном процессе. Предложен

методический механизм из теории решения изобретательских задач, выступающий в качестве основы для разработки инструментов VR/AR по новому применению. Предложены доступные для широкой пользовательской аудитории конфигурации аппаратного и программного обеспечения для решения задач с помощью VR/AR.

В целом указанные предложения позволят качественно повысить эффективность процессов создания аэрокосмической техники и образовательной деятельности с использованием цифровых технологий VR/AR в аэрокосмической промышленности.

Список источников

1. Поляков А.А., Защиринский С.А. Использование виртуального пространства для проведения макетно-конструкторских испытаний по электронному макету космического аппарата // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=107877>
2. Князев А.С., Антоненко А.С., Арбузов Е.Д., Чеботарёв А.Д. Использование имитатора многофункционального индикатора самолёта в учебном процессе вуза // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165568>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-2
3. Ревенков А.В., Резчикова Е.В. Теория и практика решения технических задач. - М.: Форум, 2008. - 384 с.
4. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. - М.: Машиностроение, 1988. - 368 с.

5. Назаренко К.А., Багаева А.П. Перспективы применения VR технологий // VI Международная научно-практическая конференция, посвященная Дню космонавтики «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 13-17 апреля 2020): сборник трудов. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2020. С. 358-360.
6. Vlasov S., Borgest N. Application of virtual reality technology based on ontology in education of aviation // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2020. № 4. С. 263-266.
7. Гладких А.П. Тенденции развития виртуальной реальности // VI Международная научно-практическая конференция, посвященная Дню космонавтики «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 13-17 апреля 2020): сборник трудов. - Красноярск, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2020. С. 768-770.
8. Ефремов А.В., Тяглик М.С., Кошеленко А.В., Тищенко А.Н., Тяглик А.С., Сапрыкин О.А., Гребенщиков А.В., Соболевский В.Г., Максимов А.С. Комплекс виртуальной реальности для моделирования и демонстрации процессов спуска и посадки пилотируемого космического аппарата на лунную поверхность // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 6. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.018-025
9. Andrea F. Abate, Mariano Guida, Paolo Leoncini, Michele Nappi, Stefano Ricciardi. A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry // Journal of Visual Languages & Computing, 2009, no. 20(5), pp. 318-325. DOI: 10.1016/j.jvlc.2009.07.003

10. Михайлюк М.В., Мальцев А.В., Тимохин П.Ю., Страшнов Е.В., Крючков Б.И., Усов В.М. Системы виртуального окружения для прототипирования на моделирующих стендах использования космических роботов в пилотируемых полетах // Пилотируемые полеты в космос. 2020. № 2 (35). С. 61-75. DOI 10.34131/MSF.20.2.61-75
11. Бубеев Ю.А., Усов В.М., Крючков Б.И., Алтунин А.А., Долгов П.П., Михайлюк М.В. Использование в изоляционных экспериментах технологий виртуальной и дополненной реальности для моделирования выходов в открытый космос без страховочного фала // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2021. Т. 55. № 2. С. 15-28. DOI: 10.21687/0233-528X-2021-55-2-15-28
12. Бубеев Ю.А., Усов В.М., Сергеев С.Ф., Крючков Б.И., Михайлюк М.В., Йоханнес Б. Итоги космического эксперимента «Пилот-Т» для моделирования взаимодействия в системе «человек-робот» // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 7. С. 65-75. DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-7-65-75
13. Бубеев Ю.А., Усов В.М., Крючков Б.И., Сыркин Л.Д., Михайлюк М.В. Способность оператора к ведению пространственной ориентировки при дистанционном управлении беспилотными аппаратами в виртуальной среде // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2021. Т. 55. № 3. С. 16-27. DOI: 10.21687/0233-528X-2021-55-3-16-27
14. Бубеев Ю.А., Усов В.М., Поляков А.В., Михайлюк М.В. Имитационное моделирование с помощью виртуального окружения режимов управления летающими аппаратами на лунной станции для изучения операторской деятельности

- в изоляционных экспериментах // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2022. Т. 56. № 5. С. 14-28. DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-5-14-28
15. Maltsev A.V., Mikhaylyuk M.V. Visualization and virtual environment technologies in the task of cosmonaut training // *Scientific Visualization*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 16-25. DOI: 10.26583/sv.12.3.02
16. Рыженков С.П., Усов В.М., Михайлюк М.В., Сыркина А.Л. Использование исследовательских стендов для моделирования дистанционного взаимодействия человека-оператора с беспилотными летательными аппаратами // Научно-практическая конференция «Актуальные вопросы авиационно-космической медицины, авиационной психологии и военной эргономики» (Москва, 28-29 ноября 2019): сборник трудов к 85летию НИИЦ (АКМ и ВЭ). – М.: Изд-во «Перо», 2020. С. 173-183.
17. Михайлюк М.В., Мальцев А.В., Тимохин П.Ю., Страшнов Е.В., Крючков Б.И., Усов В.М. Система виртуального окружения VirSim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов // *Пилотируемые полеты в космос*. 2020. № 4 (37). С. 72-95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95
18. Алтунин А.А., Долгов П.П., Жамалетдинов Н.Р., Иродов Е.Ю., Коренной В.С. Направления применения технологий виртуальной реальности при подготовке космонавтов к внекорабельной деятельности // *Пилотируемые полеты в космос*. 2021. № 1 (38). С. 72-88. DOI: 10.34131/MSF.21.1.72-88
19. Сергеев С.Ф., Харламов М.М., Крючков Б.И., Усов В.М., Михайлюк М.В. Виртуальные среды обучения в задачах освоения Луны с помощью роботов //

Робототехника и техническая кибернетика. 2020. Т. 8. № 3. С. 165-174. DOI: 10.31776/RTSJ.8301

20. Карпенко М.П., Давыдов Д.Г., Чмыхова Е.В. Обучение экипажей в ходе делительных космических полетов как средство поддержания социализации и когнитивных особенностей космонавтов // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 6. С. 19-25. DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-6-19-25

21. Розанов И.А., Кузнецова П.Г., Савинкина А.О., Швед Д.М., Рюмин О.О., Томиловская Е.С., Гущин В.И. Психологическая поддержка на основе виртуальной реальности в эксперименте с трехсуточной «сухой» иммерсией // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 1. С. 55-61. DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-1-55-61

22. Лагкуев М.С., Котлов И.Н., Судаков М.А., Шевченко А.В. Интерактивный процедурный тренажёр первоначальной подготовки авиационного персонала с использованием виртуальной реальности // Вестник военного образования. 2021. № 1 (28). С. 59-62.

23. Бурмистров В.И., Иванов И.В., Маткевич Е.И., Праскурничий Е.А. Оценка факторов аварийности беспилотных летательных аппаратов // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 73-84. DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-73-84

24. Костин П.С., Верецагин Ю.О., Волошин В.А. Программно-моделирующий комплекс для полунатурного моделирования динамики маневренного самолета // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57706>

25. Прокушев Н.И., Олейников Е.П. Цифровые двойники в проектировании ракетно-космической техники // VIII международная научно-практическая конференция, посвященная Дню космонавтики «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 11-15 апреля 2022): сборник трудов. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева. 2022. С. 151-153.
26. Gorshkalev A.A., Kayukov S.S., Korneev S.S., Uralapkin V.V. Modeling a VR-type piston engine as the power plant // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, pp. 012066. DOI:10.1088/1757-899X/177/1/012066
27. Черкунов М.А. Применение VR/AR технологий при выборе угла стреловидности крыла самолета // XV Всероссийская студенческая научная школа «Аэрокосмическая декада 2022» (Ярополец, 2022): сборник трудов. – М.: Изд-во «Перо», 2022. С. 240-244.
28. Лукацкий Е.Д. Инновационные подходы к разработке легкого пилотажного самолёта // XLIV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2018» (Москва-Ахтубинск-Байконур, 17-20 апреля 2018): сборник тезисов докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2018. С. 58-59.
29. Borgest N.M., Vlasov S.A. Using virtual technology in the design of complex systems // Programmная Ingeneria. 2022. Т. 13. № 6. С. 286-290. DOI: 10.17587/prin.13.286-290
30. Ahmad A., Al-Ahmari A.M., Aslam M.U., Abidi M.H., Darmoul S. Virtual assembly of an airplane turbine engine // IFAC-PapersOnLine, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 1726-1731. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.335

31. Рахмилевич И.Е. VR-разработка модели робота // XLV Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения – 2019» (Москва, Барнаул, Ахтубинск, 16-19 апреля 2019): сборник тезисов докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2019. С. 290-291.
32. Jezernik A., Hren G. A solution to integrate computer-aided design (CAD) and virtual reality (VR) databases in design and manufacturing processes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, vol. 22, no. 11-12, pp. 768-774. DOI:10.1007/s00170-003-1604-3
33. Пустовалова В.Д. Применение квадрокоптеров для создания 3D моделей // IV Международная научно-практическая конференция «Современная наука в условиях модернизационных процессов: проблемы, реалии перспективы» (Уфа, 05 января 2021): сборник статей. – Уфа: Научно-издательский центр "Вестник науки", 2021. С. 293-296.
34. Опарин Д.А., Опарина Е.А. Современное применение виртуальной реальности в приложениях САПР // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2021. Т. 2. С. 135-141.
35. Sławomir Tadeja, Pranay Seshadri, P.O. Kristensson. AeroVR: An immersive visualization system for aerospace design and digital twinning in virtual reality // Aeronautical Journal -New Series, 2020, vol. 124(1280), pp. 1-21. DOI: 10.1017/aer.2020.49
36. Соломкин Г.В., Александрова А.Ю., Позднякова Е.А., Сорокин А.Г. Обучающий модуль по сборке в виртуальной реальности (VR) в условиях цифровой

трансформации производства // 17-ая молодежная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической, авиационной и других высокотехнологичных отраслях промышленности»: сборник материалов. – М.: 2022. С. 65-67.

37. Булгаков А.В., Гаврик И.Н. Проблемы управления центрифугой при создании стенда с технологией VR // XIII Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос»: сборник докладов. - М.: 2019. С. 228-229.

38. Чернышева А.В., Бойченко Т.А., Резниченко Г.А. Виртуальная реальность в науке и технике // Гуманитарный вестник. 2015. № 8. URL: <http://hmbul.bmstu.ru/catalog/hum/phil/282.html>

39. Митин Р.А., Позднякова Е.А., Сорокин А.Г. Применение VR технологий в обучении промышленной безопасности в условиях цифровой трансформации производства // 17-ая молодежная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической, авиационной и других высокотехнологичных отраслях промышленности»: сборник материалов. – М.: 2022. С. 49-53.

40. Lv S., Zhang Q., Wang L. VR air rescue immersive simulation system // Digest of Technical Papers - SID International Symposium, 2021, pp. 717. DOI:10.1002/sdtp.15265

41. Олейников А.О., Ефремов П.А., Козлов М.А., Храмцов А.М. Интерактивный тренажер для осуществления тренировок с помощью виртуальной реальности. Патент на изобретение 2761325 С1, 07.12.2021.

42. Епифанцев К.В. Использование Cartona, Seamatica и Solid Works для разработки интерактивных руководств в машиностроении // Международная научно-практическая конференция «Достижения фундаментальных и прикладных

исследований технических и физико-математических наук» (Магнитогорск, 08 мая 2020): сборник статей. – Стерлитамак: АМИ, 2020. С. 9-13.

43. Aerospace digital twinning in virtual reality. 2022. URL: <https://www.turing.ac.uk/research/research-projects/aerospace-digital-twinning-virtual-reality>

44. Ефимов А.И., Ильин В.Н. Методология определения формы объектов по данным видеоряда камеры // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84590>

References

1. Polyakov A.A., Zashchirinskii S.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 107. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=107877>

2. Knyazev A.S., Antonenko A.S., Arbuzov E.D., Chebotarev A.D. *Trudy MAI*, 2022, no.

123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165568>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-2

3. Revenkov A.V., Rezchikova E.V. *Teoriya i praktika resheniya tekhnicheskikh zadach* (Theory and practice of solving technical problems), Moscow, Forum, 2008. 384 p.

4. Polovinkin A.I. *Osnovy inzhenerenogo tvorchestva* (Fundamentals of engineering creativity), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 368 p.

5. Nazarenko K.A., Bagaeva A.P. *VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya Dnyu kosmonavtiki «Aktual'nye problemy aviatsii i*

kosmonavtiki»: sbornik trudov. Krasnoyarsk, Sibirskii gosudarstvennyi universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M.F. Reshetneva, 2020, pp. 358-360.

6. Vlasov S., Borgest N. *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh system*, 2020, no. 4, pp. 263-266.

7. Gladkikh A.P. *VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya Dnyu kosmonavtiki «Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*»: sbornik trudov. Krasnoyarsk, Sibirskii gosudarstvennyi universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M.F. Reshetneva, 2020, pp. 768-770.

8. Efremov A.V., Tyaglik M.S., Koshelenko A.V., Tishchenko A.N., Tyaglik A.S., Saprykin O.A., Grebenschikov A.V., Sobolevskii V.G., Maksimov A.S. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2015, no. 6. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.018-025

9. Andrea F. Abate, Mariano Guida, Paolo Leoncini, Michele Nappi, Stefano Ricciardi. A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry, *Journal of Visual Languages & Computing*, 2009, no. 20(5), pp. 318-325. DOI: 10.1016/j.jvlc.2009.07.003

10. Mikhailyuk M.V., Mal'tsev A.V., Timokhin P.Yu., Strashnov E.V., Kryuchkov B.I., Usov V.M. *Pilotiruemye polety v kosmos*, 2020, no. 2 (35), pp. 61-75. DOI 10.34131/MSF.20.2.61-75

11. Bubeev Yu.A., Usov V.M., Kryuchkov B.I., Altunin A.A., Dolgov P.P., Mikhailyuk M.V. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2021, vol. 55, no. 2, pp. 15-28. DOI: 10.21687/0233-528X-2021-55-2-15-28

12. Bubeev Yu.A., Usov V.M., Sergeev S.F., Kryuchkov B.I., Mikhailyuk M.V., Iokhannes B. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2019, vol. 53, no. 7, pp. 65-75. DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-7-65-75
13. Bubeev Yu.A., Usov V.M., Kryuchkov B.I., Syrkin L.D., Mikhailyuk M.V. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2021, vol. 55, no. 3, pp. 16-27. DOI: 10.21687/0233-528X-2021-55-3-16-27
14. Bubeev Yu.A., Usov V.M., Polyakov A.V., Mikhailyuk M.V. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2022, vol. 56, no. 5, pp. 14-28. DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-5-14-28
15. Maltsev A.V., Mikhaylyuk M.V. Visualization and virtual environment technologies in the task of cosmonaut training, *Scientific Visualization*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 16-25. DOI: 10.26583/sv.12.3.02
16. Ryzhenkov S.P., Usov V.M., Mikhailyuk M.V., Syrkina A.L. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nye voprosy aviatsionno-kosmicheskoi meditsiny, aviatsionnoi psikhologii i voennoi ergonomiki»*: sbornik trudov k 85letiyu NIITs (AKM i VE), Moscow, Izd-vo «Pero», 2020, pp. 173-183.
17. Mikhailyuk M.V., Mal'tsev A.V., Timokhin P.Yu., Strashnov E.V., Kryuchkov B.I., Usov V.M. *Pilotiruemye polety v kosmos*, 2020, no. 4 (37), pp. 72-95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95
18. Altunin A.A., Dolgov P.P., Zhamaletdinov N.R., Irodov E.Yu., Korennoi V.S. *Pilotiruemye polety v kosmos*, 2021, no. 1 (38), pp. 72-88. DOI: [10.34131/MSF.21.1.72-88](https://doi.org/10.34131/MSF.21.1.72-88)

19. Sergeev S.F., Kharlamov M.M., Kryuchkov B.I., Usov V.M., Mikhailyuk M.V. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 165-174. DOI: 10.31776/RTCJ.8301
20. Karpenko M.P., Davydov D.G., Chmykhova E.V. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2018, vol. 52, no. 6, pp. 19-25. DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-6-19-25
21. Rozanov I.A., Kuznetsova P.G., Savinkina A.O., Shved D.M., Ryumin O.O., Tomilovskaya E.S., Gushchin V.I. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2022, vol. 56, no. 1, pp. 55-61. DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-1-55-61
22. Lagkuev M.S., Kotlov I.N., Sudakov M.A., Shevchenko A.V. *Vestnik voennogo obrazovaniya*, 2021, no. 1 (28), pp. 59-62.
23. Burmistrov V.I., Ivanov I.V., Matkevich E.I., Praskurnichii E.A. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2022, vol. 56, no. 2, pp. 73-84. DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-73-84
24. Kostin P.S., Vereshchagin Yu.O., Voloshin V.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57706>
25. Prokushev N.I., Oleinikov E.P. *VIII mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya Dnyu kosmonavtiki «Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki»*: sbornik trudov. Krasnoyarsk, Sibirskii gosudarstvennyi universitet nauki i tekhnologii im. akad. M.F. Reshetneva, 2022, pp. 151-153.
26. Gorshkalev A.A., Kayukov S.S., Korneev S.S., Uralapkin V.V. Modeling a VR-type piston engine as the power plant, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, pp. 012066. DOI:10.1088/1757-899X/177/1/012066

27. Cherkunov M.A. *XV Vserossiiskaya studencheskaya nauchnaya shkola «Aerokosmicheskaya dekada 2022»*: sbornik trudov. Moscow, Izd-vo «Pero», 2022, pp. 240-244.
28. Lukatskii E.D. *XLIV Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «Gagarinskie chteniya – 2018»*: sbornik tezisov dokladov. Moscow, Izd-vo MAI, 2018, pp. 58-59.
29. Borgest N.M., Vlasov S.A. *Programmnaya Ingeneria*, 2022, vol. 13, no. 6, pp. 286-290. DOI: 10.17587/prin.13.286-290
30. Ahmad A., Al-Ahmari A.M., Aslam M.U., Abidi M.H., Darmoul S. Virtual assembly of an airplane turbine engine, *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 1726-1731. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.335
31. Rakhmilevich I.E. *XLV Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «Gagarinskie chteniya – 2019»*: sbornik tezisov dokladov. Moscow, Izd-vo MAI, 2019, pp. 290-291.
32. Jezernik A., Hren G. A solution to integrate computer-aided design (CAD) and virtual reality (VR) databases in design and manufacturing processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, vol. 22, no. 11-12, pp. 768-774. DOI:10.1007/s00170-003-1604-3
33. Pustovalova V.D. *IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennaya nauka v usloviyakh modernizatsionnykh protsessov: problemy, realii perspektivy»*: sbornik statei. Ufa, Nauchno-izdatel'skii tsentr "Vestnik nauki", 2021, pp. 293-296.

34. Oparin D.A., Oparina E.A. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2021, vol. 2, pp. 135-141.
35. Sławomir Tadeja, Pranay Seshadri, P.O. Kristensson. AeroVR: An immersive visualization system for aerospace design and digital twinning in virtual reality, *Aeronautical Journal -New Series*, 2020, vol. 124(1280), pp. 1-21. DOI: 10.1017/aer.2020.49
36. Solomkin G.V., Aleksandrova A.Yu., Pozdnyakova E.A., Sorokin A.G. *17-aya molodezhnaya konferentsiya «Novye materialy i tekhnologii v raketno-kosmicheskoi, aviatsionnoi i drugikh vysokotekhnologichnykh otraslyakh promyshlennosti»*: sbornik materialov. Moscow, 2022, pp. 65-67.
37. Bulgakov A.V., Gavrik I.N. *XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Pilotiruemye polety v kosmos»*: sbornik dokladov. Moscow, 2019, pp. 228-229.
38. Chernysheva A.V., Boichenko T.A., Reznichenko G.A. *Gumanitarnyi vestnik*, 2015, no. 8. URL: <http://hmbul.bmstu.ru/catalog/hum/phil/282.html>
39. Mitin R.A., Pozdnyakova E.A., Sorokin A.G. *17-aya molodezhnaya konferentsiya «Novye materialy i tekhnologii v raketno-kosmicheskoi, aviatsionnoi i drugikh vysokotekhnologichnykh otraslyakh promyshlennosti»*: sbornik materialov. Moscow, 2022, pp. 49-53.
40. Lv S., Zhang Q., Wang L. VR air rescue immersive simulation system, *Digest of Technical Papers - SID International Symposium*, 2021, pp. 717. DOI:10.1002/sdtp.15265

41. Oleinikov A.O., Efremov P.A., Kozlov M.A., Khramtsov A.M. *Patent na izobretenie 2761325 C1*, 07.12.2021.
42. Epifantsev K.V. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Dostizheniya fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk»*: sbornik statei. Sterlitamak, AMI, 2020, pp. 9-13.
43. *Aerospace digital twinning in virtual reality*. 2022. URL: <https://www.turing.ac.uk/research/research-projects/aerospace-digital-twinning-virtual-reality>
44. Efimov A.I., Il'in V.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84590>

Статья поступила в редакцию 23.12.2022

Одобрена после рецензирования 10.01.2023

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 23.12.2022; approved after reviewing on 10.01.2023; accepted for publication on 27.02.2023