

УДК 621.7/.9:004.946

Влияние иммерсивного трекинга в виртуальной реальности на оценку технологичности при подготовке аддитивного производства

Шаповалов Петр Анатольевич

22061949@list.ru

SPIN-код: 4473-5507

АО «Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики»,
Москва, Россия

Аннотация. Активное внедрение аддитивных технологий в промышленность вызывает растущую потребность в инженерах, владеющих методологией проектирования аддитивного производства (Design for Additive Manufacturing — DfAM). Традиционные подходы к формированию DfAM-компетенций на основе физического прототипирования или не иммерсивных САХ-системах характеризуются либо высокой стоимостью, либо ограниченной наглядностью при работе со сложными пространственными формами. В качестве перспективного инструмента преодоления этих ограничений рассматриваются технологии иммерсивной виртуальной реальности (VR), обеспечивающие естественную поддержку трехмерного восприятия. В работе представлена оценка влияния иммерсивного трекинга в среде виртуальной реальности на процесс и результаты оценки технологичности при подготовке аддитивного производства. В рамках исследования проводился сравнительный анализ качества проектных решений, когнитивной нагрузки и уровня вовлеченности инженеров-проектировщиков при работе в иммерсивной и традиционной неиммерсивной средах. Статистический анализ не выявил значимых различий в итоговых показателях оценки технологичности между иммерсивной и неиммерсивной модальностями, что подтверждает валидность применения VR для задач DfAM, уровень когнитивной нагрузки также оказался сопоставимым в обеих группах. Применение факторного анализа позволило зафиксировать статистически значимое различие в уровне активной вовлеченности: работа в виртуальной реальности способствовала качественно более глубокому взаимодействию с геометрией проектируемых объектов при сохранении сходных показателей пассивной вовлеченности.

Ключевые слова: аддитивное производство, проектирование, виртуальная реальность, иммерсивный трекинг, оценка технологичности, когнитивная нагрузка, человеко-машинное взаимодействие

Impact of immersive tracking in virtual reality on the assessment of manufacturability in the preparation of additive manufacturing

Shapovalov Petr Anatolyevich

22061949@list.ru

SPIN-code: 4473-5507

Central Research Institute of Automation and Hydraulics, Moscow, Russia

Abstract. The active introduction of additive technologies into industry is causing a growing need for engineers who own the Design for Additive Manufacturing (DfAM) methodology.

Traditional approaches to the formation of DfAM competencies based on physical prototyping or non-immersive CAx systems are characterized by either high cost or limited visibility when working with complex spatial forms. Immersive virtual reality (VR) technologies are considered as a promising tool for overcoming these limitations, providing natural support for three-dimensional perception. The paper presents an assessment of the impact of immersive tracking in a virtual reality environment on the process and the results of assessing manufacturability in the preparation of additive manufacturing. As part of the study, a comparative analysis of the quality of design solutions, cognitive load and the level of involvement of design engineers when working in immersive and traditional non-immersive environments was carried out. The statistical analysis did not reveal significant differences in the final indicators of the assessment of manufacturability between immersive and non-immersive modalities, which confirms the validity of the use of VR for DfAM tasks, the level of cognitive load was also comparable in both groups. The use of factor analysis made it possible to record a statistically significant difference in the level of active involvement: work in virtual reality contributed to qualitatively deeper interaction with the geometry of the designed objects while maintaining similar indicators of passive involvement.

Keywords: additive manufacturing, design, virtual reality, immersive tracking, evaluation of manufacturability, cognitive load, human-machine interaction

Введение. Аддитивные технологии продолжают активно внедряться в промышленные процессы разработки изделий, находя применение в аэрокосмической, автомобильной, медицинской и многих других отраслях. В отличие от традиционных субтрактивных методов, аддитивное производство позволяет создавать объекты со сложной геометрией непосредственно из цифровых моделей, открывая возможности для реализации конструкций, ранее недоступных для изготовления [1]. Это создает растущий спрос на специалистов, способных эффективно проектировать детали с учетом требований и возможностей аддитивного производства. Специалистам в области проектирования необходимо развивать интуитивное понимание DfAM и генерировать инновационные решения, использующие преимущества 3D-печати. Однако традиционные ресурсы для развития DfAM-интуиции исторически ограничиваются физическими прототипами или неиммерсивными цифровыми средствами. Физическое прототипирование, обеспечивая наглядность, сопряжено со значительными временными и материальными затратами, особенно при множественных итерациях. Неиммерсивные CAx-системы, хотя и снижают стоимость визуализации, не всегда обеспечивают полноту восприятия сложных пространственных форм и технологических ограничений.

Иммерсивная виртуальная реальность естественным образом поддерживает трехмерное пространственное восприятие и мышление, что предполагает ее интуитивную применимость для оценки геометрически сложных конструкций и развития DfAM-интуиции. Технологии виртуальной реальности позволяют пользователю полностью погрузиться в виртуальную среду, взаимодействуя с цифровыми моделями в масштабе 1:1 и используя естественные движения для манипуляции объектами. Ключевым компонентом здесь выступает иммерсивная трекинг-система отслеживания положения головы, рук

и взгляда пользователя в реальном времени, обеспечивающая эффект присутствия и натуральное взаимодействие с виртуальными объектами.

Несмотря на очевидный потенциал, эффекты погружения на оценку технологичности в контексте технологий аддитивного производства остаются недостаточно изученными. Исследования в области применения иммерсивной виртуальной реальности в инженерном проектировании преимущественно фокусировались на общих вопросах анализа проектных решений, тогда как специфика оценки именно технологичности для аддитивного производства требует отдельного рассмотрения [2]. Остается открытым вопрос о том, как различные уровни иммерсивности влияют на точность выявления технологических ограничений: необходимость поддержек, ориентация детали, анизотропия свойств, а также на когнитивные процессы специалиста в области проектирования.

Данное исследование направлено на восполнение указанного пробела путем изучения влияния иммерсивного трекинга в виртуальной реальности на процесс и результаты оценки технологичности при подготовке аддитивного производства. В рамках работы решаются следующие задачи:

- 1) проведение сравнительного анализа качества оценки технологичности в иммерсивной (VR) и неиммерсивной (CAx) средах;
- 2) оценка когнитивной нагрузки, испытываемой специалистами в области проектирования при работе в различных модальностях;
- 3) исследование уровней активной и пассивной вовлеченности в процессе взаимодействия с проектируемыми объектами;
- 4) выявление латентной структуры DfAM-компетенций с применением факторного анализа для понимания когнитивных механизмов, задействованных при оценке технологичности в иммерсивной среде.

Новизна исследования заключается в системном анализе влияния иммерсивности на три ключевых аспекта DfAM-оценки: результаты, когнитивные усилия и характер вовлеченности. Применение смешанного метода исследования, сочетающего количественные и качественные данные, позволяет не только выявить статистические закономерности, но и понять глубинные механизмы взаимодействия специалиста в области проектирования с виртуальными объектами. Использование факторного анализа для выявления латентной структуры DfAM-компетенций в зависимости от модальности работы представляет собой дополнительный теоретический вклад в оптимизацию производственных процессов.

Полученные результаты имеют значение для организации процессов проектирования и профессиональной подготовки инженеров в области аддитивных технологий. Понимание того, как иммерсивность влияет на оценку технологичности, позволит разрабатывать эффективные модульные системы обучения и оценки, сочетающие преимущества различных уровней погружения. Это открывает возможности для создания гибридных сред проектирования, где иммерсивные технологии используются на этапах, требующих максимального пространственного восприятия, а традиционные CAx-инструменты — для точных расчетов и документирования.

Материалы и методы. Данное исследование выполнено с применением смешанного метода, который предполагает интеграцию количественных и качественных методов сбора и анализа данных в рамках единого экспериментального дизайна. Выбор данного подхода обусловлен сложностью объекта исследования, включающего как поддающиеся количественному измерению показатели: точность оценки, время выполнения, когнитивная нагрузка, так и требующие качественного осмысления аспекты: характер взаимодействия, субъективное восприятие, стратегии оценки технологичности. Основным аналитическим инструментом выступает факторный анализ, позволяющий снизить размерность наблюдаемых переменных и выявить латентные конструкты, объясняющие корреляции между множеством измеряемых показателей [3].

Гипотеза исследования заключается в том, что иммерсивный трекинг не просто улучшает отдельные показатели оценки технологичности, но и качественно трансформирует латентную структуру DfAM-компетенций — набор факторов, определяющих успешность специалиста в области проектирования при работе со сложными геометрическими формами. Исследование реализовано в формате эксперимента с одной независимой переменной — тип среды оценки — имеющей два уровня:

1) экспериментальная группа ($n = 22$) — оценка технологичности в иммерсивной среде виртуальной реальности и системы пространственного трекинга;

2) контрольная группа ($n = 22$) — оценка технологичности в традиционной неиммерсивной САХ-среде. Выборка сбалансирована по полу, возрасту и уровню предварительной подготовки.

Для последующего факторного анализа была разработана многомерная система показателей, включающая 17 наблюдаемых переменных, сгруппированные в три блока, представленные в табл. 1–3.

Таблица 1

1-й блок — показатели качества оценки технологичности

Код	Переменная	Способ измерения
Q1	Точность определения необходимости поддержек	Экспертная оценка (0–100 %)
Q2	Точность выбора оптимальной ориентации	Отклонение от эталонной ориентации (градусы)
Q3	Выявление зон термических напряжений	Бинарная оценка (0/1)
Q4	Оценка доступности внутренних полостей	Экспертная шкала (1–5)
Q5	Прогнозирование деформаций	Экспертная шкала (1–5)
Q6	Учет анизотропии свойств	Бинарная оценка (0/1)
Q7	Оценка необходимости постобработки	Экспертная шкала (1–5)
Q8	Интегральная оценка технологичности	5-балльная шкала

Таблица 2

2-й блок — поведенческие и физиологические показатели (5 переменных)

Код	Переменная	Способ измерения
B1	Время выполнения задания	Секунды
B2	Количество манипуляций с моделью	Частота вращений/ масштабирований
B3	Частота фиксаций взгляда на проблемных зонах	Айтрекинг (для VR-группы)
B4	Изменение частоты сердечных сокращений	Пульсоксиметр
B5	Количество ошибок при идентификации	Счет

Таблица 3

3-й блок — показатели вовлеченности

Код	Переменная	Способ измерения
E1	Активная вовлеченность	Субшкала опросника
E2	Пассивная вовлеченность	Субшкала опросника
E3	Эмоциональная валентность	Самоотчет (1–7)
E4	Субъективное присутствие	Шкала присутствия (1–7)

Для выявления латентной структуры наблюдаемых переменных применялся эксплораторный факторный анализ, выбор которого обусловлен отсутствием априорных предположений о факторной структуре DfAM-компетенций в иммерсивной среде [3].

Этапы проведения эксплораторного факторного анализа:

- проверка пригодности данных для факторного анализа: критерий Кайзера — Мейера — Олкина, требуемое значение $> 0,8$; критерий сферичности Бартлетта, $p < 0,05$;

- определение числа факторов: критерий Кайзера, собственное значение > 1 ; анализ графика «каменистой осыпи»; параллельный анализ Хорна;

- выделение факторов: метод главных факторов — предпочтителен для психометрических данных, метод максимального правдоподобия — для проверки статистической значимости;

- вращение факторов: ортогональное вращение для получения независимых факторов (если предполагается, что факторы не коррелируют), косоугольное вращение для получения коррелирующих факторов (если предполагается взаимосвязь между латентными конструктами). Выбор типа вращения осуществляется на основе теоретических предположений и эмпирической проверки корреляции факторов.

На втором этапе проводился конфирматорный факторный анализ для проверки соответствия теоретической модели эмпирическим данным на валидационной выборке. Индексы соответствия модели: χ^2/df — отношение хи-

квадрат к степеням свободы (оптимально < 3); CFI (Comparative Fit Index) — оптимально $> 0,90$; TLI (Tucker-Lewis Index) — оптимально $> 0,90$; RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation) — оптимально $< 0,08$; SRMR (Standardized Root Mean Square Residual) — оптимально $< 0,08$.

Дополнительно для оценки эффективности проектных решений применяется метод анализа среды функционирования, позволяющий проводить сравнительную оценку эффективности различных стратегий оценки технологичности [4]. Метод анализа среды функционирования основан на решении оптимизационных задач линейного программирования и позволяет определить границы эффективности для каждого участника.

Ключевой особенностью представленного дизайна исследования является раздельное проведение факторного анализа в экспериментальной (VR) и контрольной (САх) группах с последующим сравнением полученных факторных структур. Для сравнения факторных структур, полученных в двух группах, применялись следующие методы: 1) коэффициент конгруэнтности Такера — мера сходства факторных нагрузок между группами, 2) прокрустов анализ — метод вращения факторной матрицы одной группы для максимального приближения к факторной матрице другой группы с последующей оценкой степени соответствия, 3) многофакторный дисперсионный анализ с факторными значениями в качестве зависимых переменных для проверки влияния типа среды на выраженность каждого фактора.

В соответствии с логикой смешанного метода, результаты факторного анализа интерпретировались с привлечением качественных данных, полученных в ходе: протоколов «мышления вслух» — для понимания когнитивных стратегий, стоящих за каждым фактором; полуструктурированных интервью — для валидации интерпретации выделенных факторов; наблюдений за поведением — для соотнесения поведенческих паттернов с факторными значениями [3]. Качественные данные анализировались методом тематического анализа с последующей триангуляцией результатов.

При интерпретации результатов факторного анализа необходимо учитывать следующие ограничения:

- размер выборки — для надежного факторного анализа рекомендуется не менее 5 наблюдений на переменную (в данном исследовании 17 переменных при $n = 44$ обеспечивают соотношение 2,58:1, что является минимально допустимым);

- устойчивость факторной структуры — требуется кросс-валидация на независимой выборке;

- влияние индивидуальных различий — факторный анализ может маскировать индивидуальные стратегии оценки.

Результаты. Перед проведением основного статистического анализа была выполнена проверка нормальности распределения полученных данных с использованием критерия Шапиро — Уилка. Результаты показали, что распределение большинства переменных не соответствует нормальному ($p < 0,05$), что обусловило применение непараметрических методов статистиче-

ского анализа и использование метода главных факторов для факторного анализа.

В табл. 4 представлены описательные статистики для основных зависимых переменных по группам.

Таблица 4

Средние значения и стандартные отклонения по группам

Переменная	Экспериментальная группа	Контрольная группа
Интегральный показатель технологичности (0–100)	78,4 (12,3)	76,9 (13,1)
Время выполнения задания (мин)	14,2 (4,1)	16,8 (5,2)
Количество манипуляций с моделью	24,6 (8,3)	12,4 (5,7)
Когнитивная нагрузка	52,3 (14,2)	54,1 (15,6)

Для оценки адекватности выборки проведению факторного анализа был рассчитан критерий Кайзера — Мейера — Олкина. Полученное значение равно 0,81 превышает рекомендуемый порог 0,8, что свидетельствует о приемлемой пригодности данных для факторного анализа. Значения по отдельным переменным варьировались от 0,8 до 0,84, что указывает на отсутствие необходимости исключения каких-либо переменных.

Критерий сферичности Бартлетта показал статистическую значимость ($\chi^2(136) = 284,6$, $p < 0,001$), что подтверждает наличие корреляций между переменными, достаточных для проведения факторного анализа.

Анализ графика «каменистой осыпи» и критерий Кайзера (собственные значения > 1) позволили выделить три фактора, объясняющих 68,4 % суммарной дисперсии. Собственные значения факторов составили: фактор 1 — 5,82, фактор 2 — 4,31, фактор 3 — 3,94.

Применение метода главных факторов с последующим косоугольным вращением, поскольку предполагалась корреляция между факторами, позволило получить интерпретируемую факторную структуру. В табл. 5 представлены факторные нагрузки после вращения (приведены нагрузки $> 0,4$).

Таблица 5

Матрица факторных нагрузок (после вращения)

Переменная	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Общность
<i>Фактор «пространственно-интуитивная компетентность»</i>				
Q1 (точность определения необходимости поддержек)	0,82	0,21	0,18	0,76
Q2 (точность выбора оптимальной ориентации)	0,79	0,24	0,15	0,71

Окончание табл. 5

Переменная	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Общность
Q4 (оценка доступности внутренних полостей)	0,75	0,19	0,22	0,68
Q7 (оценка необходимости постобработки)	0,71	0,18	0,26	0,63
B2 (количество манипуляций с моделью)	0,68	0,12	0,31	0,59
E1 (активная вовлеченность)	0,65	0,09	0,35	0,58
<i>Фактор «аналитическая оценка»</i>				
Q3 (выявление зон термических напряжений)	0,23	0,81	0,14	0,73
Q5 (прогнозирование деформаций)	0,19	0,78	0,21	0,7
Q6 (учет анизотропии свойств)	0,16	0,74	0,18	0,64
<i>Фактор «эмоционально-поведенческая вовлеченность»</i>				
E3 (эмоциональная валентность)	0,21	0,17	0,83	0,77
B5 (количество ошибок при идентификации)	0,28	0,22	0,72	0,65
E4 (субъективное присутствие)	0,31	0,12	0,7	0,62
B1 (время выполнения задания)	0,15	0,41	0,52	0,5

Обсуждение. В фактор «пространственно-интуитивная компетентность» (объясняет 28,4 % дисперсии) вошли переменные, связанные с непосредственным восприятием геометрии детали: оценка необходимости поддержек, оптимальной ориентации, доступности внутренних полостей, а также поведенческие показатели: количество манипуляций и активная вовлеченность. Высокие нагрузки этого фактора указывают на то, что успешность оценки технологичности в значительной степени определяется способностью специалиста в области аддитивного производства к интуитивному пространственному анализу.

В фактор «аналитическая оценка» (объясняет 21,7 % дисперсии) включены переменные, требующие аналитического мышления и учета физических процессов: термические напряжения, деформации, анизотропия свойств, а также показатели когнитивной нагрузки. Этот фактор отражает инженерно-расчетную составляющую DfAM-компетенций.

Фактор «эмоционально-поведенческая вовлеченность» (объясняет 18,3 % дисперсии) объединяет физиологические показатели, субъективные оценки присутствия и эмоциональной валентности, а также временные затраты. Фак-

тор характеризует аффективный и психофизиологический компонент взаимодействия с проектируемым объектом.

Для выявления различий в латентной структуре DfAM-компетенций в зависимости от модальности работы был проведен отдельный факторный анализ в экспериментальной (VR) и контрольной САХ-группах. Экспериментальная группа: выделено 3 фактора, объясняющих 72,3 % дисперсии; доминирующий фактор — «пространственно-интуитивная компетентность» (32,1 % дисперсии); высокие нагрузки переменных активной вовлеченности ($E1 = 0,84$) и пространственных показателей. Контрольная группа: выделено 3 фактора, объясняющих 65,8 % дисперсии; доминирующий фактор — «аналитическая оценка» (29,4 % дисперсии); более высокие нагрузки временных показателей и показателей усилия.

Заключение. Экспериментальная группа демонстрирует значимо более высокие значения по фактору «пространственно-интуитивная компетентность» ($p < 0,001$, большой размер эффекта). По фактору «аналитическая оценка» значимых различий не обнаружено ($p > 0,05$). Экспериментальная группа показывает значимо более высокие значения по фактору «эмоционально-поведенческая вовлеченность» ($p < 0,01$, большой размер эффекта).

Таким образом, иммерсивный трекинг в виртуальной реальности является эффективным инструментом оценки технологичности при подготовке аддитивного производства, обеспечивающим: сопоставимое с традиционными САХ-системами качество итоговых оценок; более высокую точность при решении задач, требующих пространственного восприятия; повышенный уровень активной вовлеченности без увеличения когнитивной нагрузки; качественно иную структуру DfAM-компетенций с доминированием пространственно-интуитивных компонентов; снижение зависимости успешности оценки от предварительного опыта работы.

Полученные результаты позволяют рассматривать иммерсивные технологии не как замену традиционным САХ-системам, но как их органичное дополнение, открывающее новые возможности для инженерного проектирования и профессиональной подготовки. Выявленная факторная структура DfAM-компетенций создает основу для разработки теоретически обоснованных методик оценки и развития способностей специалистов в области аддитивных технологий.

Дальнейшее развитие исследований в данном направлении будет способствовать становлению новой парадигмы проектирования, в которой иммерсивные среды выступают не просто инструментом визуализации, но полноценной когнитивной технологией, расширяющей познавательные возможности человека и трансформирующей саму структуру инженерного мышления.

Список источников

- [1] Reinke G., Cristina dos Santos A. A systematic review and unified framework for design for additive manufacturing (DfAM). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, vol. 143(9–10). <https://doi.org/10.1007/s00170-026-17632-6>

-
- [2] Eswaran M., Raju Bahubalendruni M.V.A. Challenges and opportunities on AR/VR technologies for manufacturing systems in the context of industry 4.0: A state of the art review. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, vol. 65, pp. 260–278. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.016>
 - [3] Llobera J., Beacco A., Oliva R., Şenel G., Banakou D., Slater M. Evaluating participant responses to a virtual reality experience using reinforcement learning. *Royal Society Open Science*, 2021, vol. 8, art. no. 210537. <https://doi.org/10.1098/rsos.210537>
 - [4] Орлов С.П., Яковлева А.Е., Сусарев С.В. Многофакторный анализ эффективности автономных транспортных средств на основе метода анализа среды функционирования. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*, 2024, № 3, с. 7–16. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-3-7-16>

Содержание

Пленарные доклады. Тенденции развития технологий дополненной и виртуальной реальности	3
<i>Никоноров Н.В.</i> Повышение механической, термической и оптической прочности стеклянных элементов фотоники методом ионного обмена	5
<i>Путилин А.Н., Дубынин С.Е., Путилин Н.А., Копенкин С.С., Бородин Ю.П.</i> Тенденции развития оптических технологий дополненной реальности	10
Секция 1. Оптические схемы и элементы для дисплеев дополненной и виртуальной реальности	15
<i>Барашикина Д.В., Пясецкий В.Б.</i> Камера коротковолнового инфракрасного диапазона для промышленной инспекции	17
<i>Гататдинов Т.А., Рымов Д.А., Злоказов Е.Ю.</i> Алгоритмы компьютерной голографии для формирования изображений в когерентных волноводных системах дополненной реальности	23
<i>Сагателян Г.Р., Пискунова Е.Р., Кузнецов А.С.</i> Обоснование конструкции и технологии изготовления калибровочной меры из цветных оптических стекол	29
<i>Путилин Н.А., Смык Ф.С., Откупман Д.Г., Киселев М.Д.</i> Специфика компьютерного моделирования волноводных дифракционных элементов в AR дисплеях	37
Секция 2. Компонентная база и перспективные технологии дисплейных и фотонных систем	43
<i>Рупасов А.Е., Горевой А.В., Кудряшов С.И.</i> Запись волноводов в объеме силикатного стекла с помощью ультракоротких лазерных импульсов	45
<i>Семченков П.В., Афанасьева О.Л.</i> Особенности технологического процесса изготовления рефрактивных световодов для устройств дополненной реальности	48
Секция 3. Практическое применение ARVR устройств	53
<i>Байков В.М., Токарева П.С.</i> Интеграция LMS-систем и тренажеров виртуальной реальности	55
<i>Епифанов М.А., Павленко Д.А.</i> Опыт внедрения технологий дополненной реальности в курс лабораторных работ по общей физике	59
<i>Казаку И.А., Шаповалов А.В., Макаренков Д.А., Кочетов И.А., Щеглов Г.А., Казакова А.А.</i> Применение технологии смешанной реальности для эргономической отработки пилотируемого космического аппарата	64
<i>Макаренков Д.А., Щеглов Г.А.</i> Применение технологий смешанной реальности для визуализации трехмерных полей	68
<i>Голубев А.В., Муравьев И.К., Никоноров А.Н.</i> Создание и применение тренажеров виртуальной реальности в теплоэнергетике и подготовке оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП	72
<i>Деревич И.В., Панова А.А., Брегадзе З.</i> Цифровой двойник группы беспилотных летательных аппаратов	77
Секция 4. Эргономические аспекты использования ARVR	83
<i>Ченарани С., Шариати Ф., Щур С.Ю.</i> Принципы адаптивной компоновки элементов пользовательского интерфейса в виртуальной реальности	85

Секция 5. Алгоритмы и программное обеспечение для ARVR и систем визуализации	91
<i>Акимкин Г.А., Вернигор Н.А., Вязовых М.В.</i> Алгоритм повышения качества распознавания лиц в системах дополненной реальности при пониженной освещенности	93
<i>Алпатова М.В.</i> Риск-ориентированная модель межсессионной релокализации пространственных якорей для XR-навигации в помещении	98
<i>Арутин В.В., Алфимцев А.Н.</i> Применение генеративных моделей для создания 3D-сред в задачах мультиагентного обучения	102
<i>Вязовых М.В., Козырев В.Д., Кулиева А.М.</i> Мультиспектральная система оценки угроз движения с выводом предупреждений на лобовое стекло	107
<i>Курятников А.Д., Посевин Д.П.</i> Прототип приложения отработки навыков пилотирования с поддержкой VR-устройств	112
<i>Меркелов М.В., Локтев Д.А.</i> Анализ влияния модуля имитации сетчатки на возможность распознавания образов различными архитектурами нейронных сетей	117
<i>Моргунов Е.Ф.</i> Модульный монолит как архитектурный шаблон для создания интегрированных сред разработки и визуализации мультиагентных систем обучения с подкреплением	123
<i>Агаркова А.В., Винокурова Е.С., Посевин Д.П., Иванов И.П.</i> Об идее применения WebVR для визуализации результатов обнаружения источников лесных пожаров на труднодоступных территориях	129
<i>Базанчук Г.А., Кривоносова А.Ю., Мамаева С.М., Посевин Д.П., Агаркова А.В., Винокурова Е.С.</i> Интеграция фотограмметрических 3D-моделей экспонатов в интерактивную среду виртуального музея МГТУ им. Н.Э. Баумана	136
<i>Рахманов С.В.</i> Обнаружение изменений в окружающей среде на основе параметров состояния Wi-Fi канала	141
<i>Нефедов Г.Д., Тюсин Д.Е., Плюitto А.П., Минитаева А.М.</i> Разработка VR-симулятора управления FPV-дроном на базе Unity	145
Секция 6. Дизайн и компьютерная техника для иммерсивных сред	149
<i>Басараб М.А.</i> Обобщенный алгоритм сферической сплайн-интерполяции	151
<i>Морозов К.А.</i> Мультиагентное обучение с подкреплением для адаптивного проектирования в иммерсивных VR средах	157
<i>Дадтеев К.М., Немешаев С.А., Пак Н.Ю.</i> Особенности создания 3D-моделей для приложений виртуальной реальности на примере медицинского ускорителя частиц	162
<i>Шпынкова В.Д., Деменев Д.А.</i> Как проектировать типографику в VR для пользователей от 5 до 95 лет	168
Стеновые доклады	173
<i>Зеленов Р.Е., Шишова М.В.</i> Особенности реализации трекинга плоских маркеров на HoloLens 2	175
<i>Шаповалов П.А.</i> Влияние иммерсивного трекинга в виртуальной реальности на оценку технологичности при подготовке аддитивного производства	180

Научное издание

Технологии дополненной и виртуальной реальности

II научно-практическая конференция

(Москва, 15–16 апреля 2026 года)

Сборник статей

Художник *Э.Ш. Мурадова*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 16.06.2026. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 15,6. Тираж 50 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
<https://press.bmstu.ru>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.