

УДК 004.93 : 621.71

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ И ОБУЧЕНИЯ СБОРОЧНОГО ПЕРСОНАЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИММЕРСИВНЫХ СИСТЕМ

© 2026 И.В. Кудрявцев¹, А.А. Лим¹, А.А. Кутин^{1,2}¹МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия²Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 22.12.2025

Рассматривается подход к повышению эффективности процессов подготовки и обучения сборочного персонала машиностроительных предприятий за счёт применения иммерсивных систем (дополненной и виртуальной реальности). Предложена модель визуального сопровождения сборочных операций на базе фантомных объектов, интегрированная с гиперграфовым описанием технологического процесса. Описана динамика перемещения и ориентации объектов относительно фантомов и критерии завершения операций. Приведены результаты экспериментальных исследований на промышленном образце экструдера Hydra аддитивной установки INTED MAP, выполненные с участием операторов различной квалификации при сравнении традиционных методов и иммерсивной системы.

Ключевые слова: иммерсивные системы, дополненная и виртуальная реальность, сборочные процессы, обучение персонала, аддитивное производство, фантомные объекты, INTED MAP.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-127-132

EDN: PIDSFL

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности и качества сборочных процессов в машиностроении в условиях растущей конкуренции и усложнения изделий требует перехода к цифровым методам подготовки и поддержки персонала. Традиционные средства обучения и документирования технологических процессов не обеспечивают необходимой гибкости, скорости освоения операций и снижения ошибок.

Перспективным направлением является использование иммерсивных систем, объединяющих технологии дополненной и виртуальной реальности. Такие системы позволяют формировать для оператора пространственно совмещённую визуальную среду, в которой элементы оборудования и сборочные единицы дополняются виртуальными подсказками, инструкциями и контролем действий в режиме реального времени [1, 2].

МОДЕЛЬ ВИЗУАЛЬНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ НА БАЗЕ ФАНТОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Ключевым элементом предлагаемого подхода является система фантомных объектов, задающих целевые положения и ориентацию компонентов в пространстве (рис. 1). Для каждого физического компонента формируется виртуальный «фантом» с координатами x_p и ориентацией q_p .

Состояние системы в момент времени t описывается набором переменных:

- $H(t) \in \{0,1\}$ – индикатор нахождения объекта в руке оператора;
- $P(t) \in \{0,1\}$ – индикатор контакта с фантомом;
- $x(t) \in R^3$ – текущая позиция объекта;
- $q(t) \in SO(3)$ – текущая ориентация объекта.

Условие возврата к фантомному положению формулируется как

$$C_r(t) = \neg H(t) \wedge P(t),$$

то есть активируется при отпускании объекта в зоне фантома. Тогда положение объекта обновляется по выражению

$$x(t+\Delta t) = H(t) \cdot x_h(t) + [C_r(t) \wedge D(x(t), x_p)] \cdot x_p + [\neg(H(t) \vee (C_r(t) \wedge D(x(t), x_p)))] \cdot x(t),$$

где $D(x(t), x_p) = x(t) - x_p \geq \varepsilon$ – условие превышения порогового расстояния $\varepsilon = 0,01$ м.

Аналогично задаётся динамика ориентации через кватернионы $q(t)$. При выполнении условий возврата система плавно выравнивает объект с фантомом, визуально подсказывая оператору требуемые действия.

Кудрявцев Илья Владиславович, старший преподаватель кафедры цифровых и аддитивных технологий.

E-mail: Kudryavcev_i@mirea.ru

Лим Александр Аликович, старший преподаватель кафедры цифровых и аддитивных технологий.

E-mail: lim@mirea.ru

Кутин Андрей Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, профессор кафедры цифровых и аддитивных технологий. E-mail: 170455@mail.ru

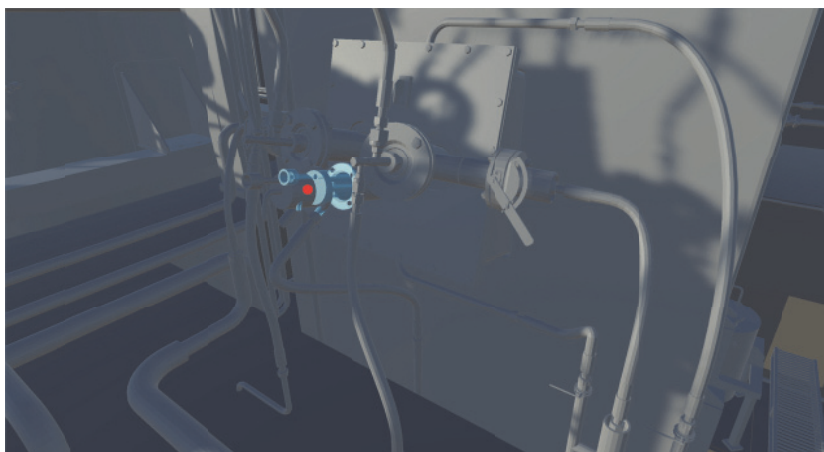


Рис. 1. Система визуального сопровождения объекта-фантома

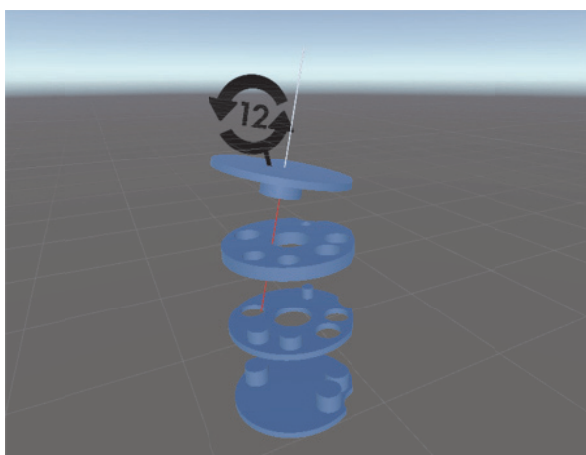


Рис. 2. Визуализация виртуального помощника отклонения угла поворота относительно заданной оси сопряжения

емый угол наклона и направление вращения для сопряжения поверхностей деталей (рис. 2) [3].

Достижение целевого положения и ориентации фиксируется при выполнении критериев:

$$|x(t) - x_p| < \varepsilon;$$

$$\|q(t) - q_p\|_F < \delta_{rot}, \text{ где } \delta_{rot} = 0,01 \text{ рад.}$$

Таким образом обеспечивается формализованное описание процесса позиционирования в иммерсивной среде.

ИНТЕГРАЦИЯ С ГИПЕРГРАФОВОЙ МОДЕЛЬЮ СБОРОЧНОГО ПРОЦЕССА

Технологический процесс сборки моделируется в виде гиперграфа, где узлы n_i соответствуют состояниям изделия и сборочным операциям, а рёбра задают зависимости и ограничения по последовательности действий. Каждой ноде сопоставляется набор параметров фантома $\Phi_i = (X_{pi}, q_{pi}, \varepsilon_i)$.

Порядок активации фантомов определяется топологической сортировкой гиперграфа с учётом весов, отражающих критичность операций и требования к точности. Иммерсивная система последовательно подсвечивает активный фантом, транслируя оператору локальные инструкции, пошаговую анимацию и контроль совместимости действий с заданной последовательностью.

Такое объединение формальной модели и визуального сопровождения позволяет адаптировать сценарий сборки под квалификацию оператора, корректируя уровень детализации подсказок, скорость подачи информации и допустимые отклонения от номинальных траекторий [4, 5].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЭКСТРУДЕРЕ HYDRA

Экспериментальная апробация методики выполнена на промышленном образце экструдера Hydra аддитивной установки INTED MAP. Иммерсивная система разрабатывалась на базе гарнитуры дополненной реальности Microsoft HoloLens 2, используемой как интерфейс для реализации предложенной модели фантомных объектов (рис. 3).

Модель экструдера была оцифрована в системе САПР, каждый компонент выделен в отдельные узлы и детали (рис. 4). Далее на основе алгоритма формализации построен гиперграф

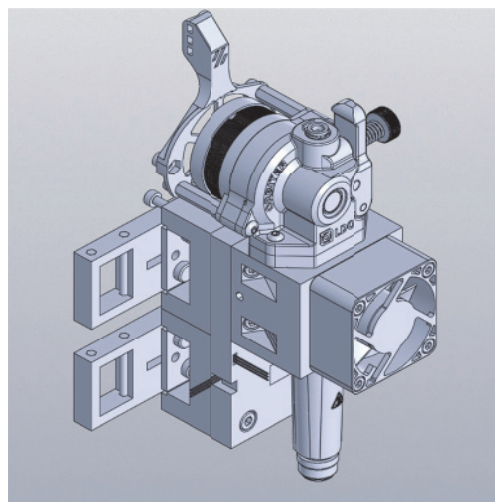


Рис. 3. Экструдер Hydra аддитивной установки INTED MAP

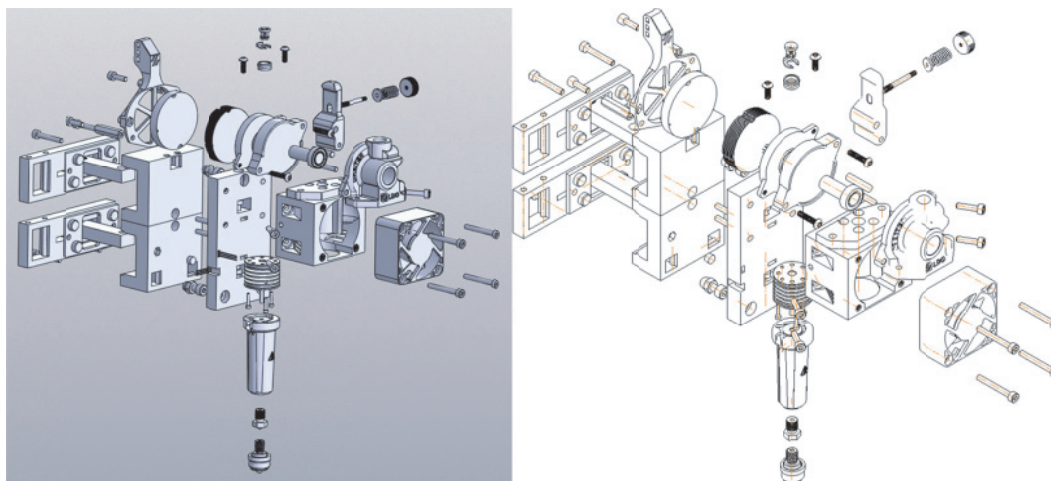


Рис. 4. Сборочный чертеж экструдера Hydra

сборочного процесса, на базе которого сгенерирована нодовая структура для иммерсивного сопровождения оператора.

В исследованиях участвовали 10 операторов различной квалификации. Каждый выполнял серию сборок по двум сценариям:

1. традиционный метод на основе текстовой и графической документации;
2. метод с использованием иммерсивной системы фантомного позиционирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Общее время сборки T представлено суммой компонент

$$T = T_{\text{основное}} + T_{\text{вспомогательное}} + T_{\text{контроль}} + T_{\text{исправление}}$$

Основное время $T_{\text{основное}}$ включает собственно установку, совмещение и затяжку элементов. При внедрении иммерсивной системы оно сократилось примерно на 14 % за счёт более точного позиционирования по фантомам. Наибольший эффект получен по вспомогательному времени $T_{\text{вспомогательное}}$ (поиск деталей, работа с документацией, планирование шага): сокращение порядка 3 раз за счёт автоматической визуализации следующей операции и отказа от бумажных инструкций [6].

Время контроля $T_{\text{контроль}}$ при иммерсивном сопровождении интегрируется непосредственно в процесс выполнения операции: отклонения от допустимого диапазона отображаются в виде подсказок, что уменьшает потребность в отдельной проверке. Время исправления ошибок $T_{\text{исправление}}$ снижается вследствие уменьшения их числа.

В целом среднее время сборки уменьшилось с 68,7 до 42,3 мин, что соответствует повышению производительности на 38,4 %, а среднее количество ошибок — с 3,8 до 1,2 на сборку (снижение на 68,4 %) (рис. 5).

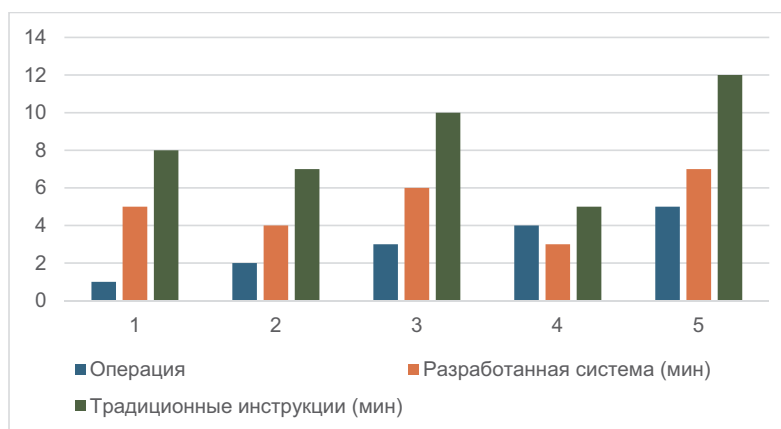


Рис. 5. Сравнение времени выполнения операций сборки с использованием разработанной системы и традиционных инструкций

Анализ кривых обучения показал экспоненциальную сходимость времени выполнения операций к оптимальному значению:

$$T(n) = T_{\text{опт}} + (T_0 - T_{\text{опт}}) \cdot \exp(-\lambda \cdot n),$$

где T_0 — время первой сборки, $T_{\text{опт}}$ — время опытного оператора, n — номер повторения. Для иммерсивной системы коэффициент скорости обучения составил $\lambda = 0,42$, тогда как для традиционного метода $\lambda_{\text{традиц}} = 0,18$ (рис. 6). Это означает, что новичок в иммерсивной среде достигает производительности опытного оператора примерно за 8–9 повторений (около 5 рабочих дней), тогда как при традиционном подходе требуется 22–25 повторений (около 15 дней).

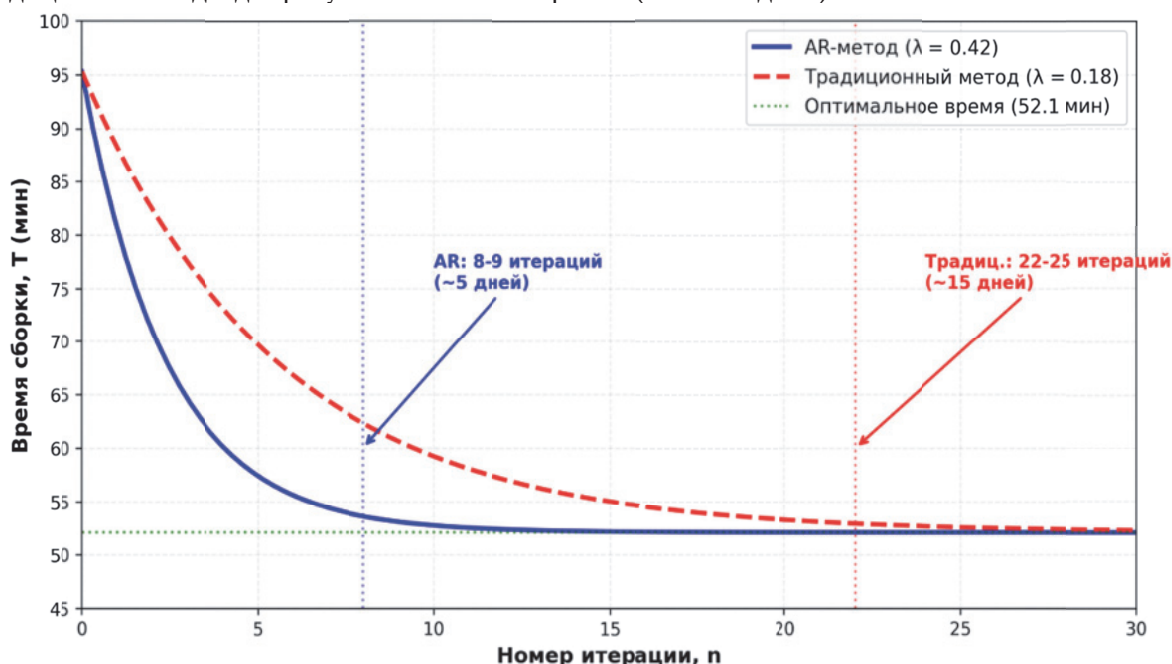


Рис. 6. Кривая обучения операторов при сборке экструдера

Зависимость времени операции от квалификации оператора K описывается гиперболой

$$T(K) = T_{\text{min}} + A / (K + B).$$

При использовании иммерсивной системы параметр A уменьшается, что указывает на снижение чувствительности времени сборки к уровню квалификации: система частично компенсирует недостаток опыта за счёт пространственных подсказок и контроля [7].

Снижение вариативности времени выполнения в 1,9 раза свидетельствует о более стабильной работе операторов в иммерсивной среде. Корреляционный анализ показал сильную отрицательную связь между числом использований иммерсивной системы и временем операции (коэффициент Пирсона $r \approx -0,87$), тогда как для традиционного метода связь слабее.

Установлена экспоненциальная зависимость уменьшения числа ошибок во времени

$$E(t) = E_{\text{min}} + (E_0 - E_{\text{min}}) \cdot \exp(-\mu \cdot t),$$

причём коэффициент μ для иммерсивной системы примерно в 2,5 раза выше, чем для традиционного обучения. Дисперсионный анализ (ANOVA) подтвердил статистически значимое влияние применения иммерсивной системы и квалификации оператора на время операций и количество ошибок, а регрессионная модель объясняет более 89 % вариации исследуемых показателей [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и исследована модель иммерсивного сопровождения сборочных процессов на основе фантомных объектов и гиперграфового описания технологического маршрута. Иммерсивная система, реализованная на промышленном образце экструдера Hydra аддитивной установки INTED MAP, продемонстрировала:

- сокращение общего времени сборки до 38 %;
- уменьшение количества ошибок почти на 70 %;
- более чем четырёхкратное ускорение обучения новых операторов;
- снижение зависимости временных характеристик от квалификации и уменьшение вариативности результатов.

Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности иммерсивных систем в задачах подготовки и обучения сборочного персонала и обоснованности их внедрения в практику машиностроительных предприятий в рамках цифровой трансформации производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лим, А. А. Инновационные подходы в технологии сборки / А. А. Лим, И. В. Кудрявцев, А. А. Кутин // Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех - 2023) : Сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 11–15 декабря 2023 года. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2023. – С. 330-334. – EDN TOGRTZ.
2. Лим, А. А. Разработка инструмента смешанной реальности для реализации процесса сопряжения поверхностей деталей при сборке / А. А. Лим, И. В. Кудрявцев, А. А. Кутин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2024. – № 7. – С. 294-298. – DOI 10.36652/0202-3350-2024-25-7-294-298. – EDN VHLECC.
3. Мокрозуб, В. Г. Применение N-ориентированных гиперграфов и реляционных баз данных для структурного и параметрического синтеза технических систем / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, А. С. Мордвин, А. А. Илясов // Прикладная информатика. – 2010. – № 4(28). – С. 115-122. – EDN MSTYFV.
4. Сабирзянова, Г. М. Повышение эффективности сборки автомобиля путем проведения предиктивного анализа с помощью технологии виртуальной реальности / Г. М. Сабирзянова, Т. В. Сидорова, Р. М. Хисамутдинов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 2. – С. 106-109. – EDN VPCWRC.
5. Решетникова, Е. С. Разработка метода визуализации производственных объектов с применением технологий дополненной реальности / Е. С. Решетникова, Т. В. Усатая, Л. В. Курзаева // Программные системы и вычислительные методы. – 2021. – № 1. – С. 10-21. – DOI 10.7256/2454-0714.2021.1.32708. – EDN UYSEDI.
6. Лим, А. А. Гиперграфовый подход к моделированию сборочных процессов: синтез с нодовыми системами и имплементация в среде смешанной реальности / А. А. Лим, А. А. Кутин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 2(73). – С. 80-89. – EDN REPEIA.
7. Лим, А. А. Повышение эффективности сборочных процессов с применением инструмента виртуальной и дополненной реальности / А. А. Лим, И. В. Кудрявцев // Современные технологии сборки : Доклады IX Международного научно-технического семинара, Москва, 16–17 октября 2025 года. – Москва: Московский политехнический университет, 2025. – С. 78-86. – EDN KXFLZJ.
8. Лим, А. А. Разработка гиперграфа для моделирования сборочных процессов для применения в среде смешанной реальности / А. А. Лим, А. А. Кутин // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2025) : Сборник докладов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Москва, 07–12 апреля 2025 года. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2025. – С. 305-310. – EDN TQNDXX.

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PROCESSES OF TRAINING
AND EDUCATION OF ASSEMBLY PERSONNEL WHEN USING IMMERSIVE SYSTEMS**

© 2026 Kudryavtsev¹, A.A. Lim¹, I.V. A.A. Kutin^{1,2}

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow

² Moscow State University of Technology “STANKIN”

An approach to improving the efficiency of the processes of training and educating assembly personnel of machine-building enterprises through the use of immersive systems (augmented and virtual reality) is considered. A model of visual support of assembly operations based on phantom objects is proposed, integrated with a hypergraphic description of the technological process. The dynamics of the movement and orientation of objects relative to the phantoms and the criteria for completing operations are described. The results of experimental studies on an industrial sample of the Hydra extruder of the INTED MAP additive installation, performed with the participation of operators of various qualifications when comparing traditional methods and an immersive system, are presented.

Keywords: immersive systems, augmented and virtual reality, assembly processes, staff training, additive manufacturing, phantom objects, INTED MAP.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-127-132

EDN: PIDSFL

REFERENCES

1. *Lim, A. A.* Innovacionnye podhody v tekhnologii sborki / A. A. Lim, I. V. Kudryavcev, A. A. Kutin // Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemy (Optotekh - 2023) : Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Moskva, 11–15 dekabrya 2023 goda. – Moskva: MIREA - Rossijskij tekhnologicheskij universitet, 2023. – S. 330-334. – EDN TOGRTZ.
2. *Lim, A. A.* Razrabotka instrumenta smeshannoj real'nosti dlya realizacii processa sopryazheniya poverhnostej detalej pri sborke / A. A. Lim, I. V. Kudryavcev, A. A. Kutin // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. – 2024. – № 7. – S. 294-298. – DOI 10.36652/0202-3350-2024-25-7-294-298. – EDN BHLECC.
3. *Mokrozub, V. G.* Primenenie N-orientirovannyh gipergrafov i relyacionnyh baz dannyh dlya strukturnogo i parametricheskogo sinteza tekhnicheskikh sistem / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. S. Mordvin, A. A. Ilyasov // Prikladnaya informatika. – 2010. – № 4(28). – S. 115-122. – EDN MSTYFV.
4. *Sabirzyanova, G. M.* Povyshenie effektivnosti sborki avtomobilya putem provedeniya prediktivnogo analiza s pomoshch'yu tekhnologii virtual'noj real'nosti / G. M. Sabirzyanova, T. V. Sidorova, R. M. Hisamutdinov // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya. – 2023. – № 2. – S. 106-109. – EDN BPCWRC.
5. *Reshetnikova, E. S.* Razrabotka metoda vizualizacii proizvodstvennyh ob'ektov s primeneniem tekhnologij dopolnennoj real'nosti / E. S. Reshetnikova, T. V. Usataya, L. V. Kurzaeva // Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody. – 2021. – № 1. – S. 10-21. – DOI 10.7256/2454-0714.2021.1.32708. – EDN UYSEDI.
6. *Lim, A. A.* Gipergrafovyy podhod k modelirovaniyu sborochnyh processov: sintez s nodovymi sistemami i implementaciya v srede smeshannoj real'nosti / A. A. Lim, A. A. Kutin // Vestnik MGTU «Stankin». – 2025. – № 2(73). – S. 80-89. – EDN REPEIA.
7. *Lim, A. A.* Povyshenie effektivnosti sborochnyh processov s primeneniem instrumenta virtual'noj i dopolnennoj real'nosti / A. A. Lim, I. V. Kudryavcev // Sovremennye tekhnologii sborki : Doklady IX Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar, Moskva, 16–17 oktyabrya 2025 goda. – Moskva: Moskovskij politekhnicheskij universitet, 2025. – S. 78-86. – EDN KXFLZJ.
8. *Lim, A. A.* Razrabotka gipergrafa dlya modelirovaniya sborochnyh processov dlya primeneniya v srede smeshannoj real'nosti / A. A. Lim, A. A. Kutin // Perspektivnye materialy i tekhnologii (PMT-2025) : Sbornik dokladov Nacional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Moskva, 07–12 aprelya 2025 goda. – Moskva: MIREA - Rossijskij tekhnologicheskij universitet, 2025. – S. 305-310. – EDN TQNDXX.