

Труды МАИ. 2025. № 141
Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.)

Научная статья

УДК 004.04

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184074>

EDN: <https://www.elibrary.ru/ZRRMZW>

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПРОЦЕССОВ РЕГЕНЕРАЦИИ В СИСТЕМАХ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Илона Марковна Куликовских

Самарский государственный медицинский университет Минздрава России,

Самара, Российская Федерация

i.m.kulikovskikh@samsmu.ru

Аннотация. Рассматривается проблема разработки цифровых двойников, связанная с необходимостью динамического изменения уровня детализации описания физического объекта в пространственных и временных шкалах. Определены ограничения, накладываемые на интеграцию данной технологии в автономные системы, которые включают: выполнение рабочих процессов на периферийных или встроенных устройствах, обеспечение непрерывного потока данных с необходимой частотой, нормативные требования к безопасности и сохранности передаваемых данных. Выявлены неявные факторы, влияющие на оценку целесообразности цифрового двойника и приводящие к накоплению ошибок, нерациональному использованию ресурсов и повышению рисков при принятии критических решений. Проведен анализ первопричин, влияющих на установление баланса между компактностью реализации цифрового решения и точностью воспроизведения его физического аналога. Разработан прототип цифрового двойника процессов регенерации в системах жизнеобеспечения, особенностью которого является оптимизация используемых ресурсов за счет его автоматической пересборки в реальном времени. Механизмы пересборки построены на ключевых принципах

организации сложных систем – абстрагировании, модульности, декомпозиции и итерации, которые позволяют имитировать непрерывную динамику, наблюдаемую в процессах регенерации. Переключение между механизмами зависит от предъявляемых требований к прототипу в текущий момент времени: вычислительная эффективность, гибкость и масштабируемость, анализ первопричин или устранение неполадок, отслеживание изменений в динамике. Приведены результаты вычислительных экспериментов, подтверждающие эффективность разработанного прототипа в управлении физико-химическими процессами очистки диоксида углерода и генерации кислорода в условиях изменений состояния среды, нагрузки и деградации компонентов. Представленные результаты позволяют сделать вывод, что возможность автоматической пересборки прототипа оптимизирует используемые в системе ресурсы за счет поддержания высокой эффективности и устойчивости в критических условиях.

Ключевые слова: цифровой двойник, системный подход, система жизнеобеспечения, физико-химические процессы регенерации

Для цитирования: Куликовских И.М. Цифровой двойник процессов регенерации в системах жизнеобеспечения // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184074>

Original article

DIGITAL TWIN OF REGENERATIVE PROCESSES IN LIFE SUPPORT SYSTEMS

Ilona M. Kulikovskikh

Samara State Medical University,

Samara, Russian Federation

i.m.kulikovskikh@samsmu.ru

Abstract. The paper presents a major challenge for digital twins in adapting models of different fidelity to a vast range of spatial and temporal scales. The limitations of integrating

this technology into autonomous systems include: executing workflows on edge or embedded devices, ensuring a continuous data stream at the required frequency, and meeting regulatory requirements for the security and safety of transmitted data. Additionally, implicit factors influencing the feasibility of digital twins were uncovered, such as the accumulation of errors, inefficient resource use, and increased risks in critical decision-making. An analysis of root causes was conducted to establish a balance between the compact implementation of the digital solution and the accuracy of reproducing its physical counterpart. The proposed prototype of the digital twin for regenerative processes in life support systems optimizes resource use by automatically reconfiguring in real time. The mechanisms for reconfiguration are built on key principles of organising complex systems – abstraction, modularity, decomposition, and iteration – which enable the simulation of continuous dynamics observed in regenerative processes. Switching between these mechanisms depends on the current requirements of the prototype: computational efficiency, flexibility and scalability, root cause analysis or troubleshooting, and tracking changes in dynamics. The results of computational experiments confirmed the efficiency of the prototype in managing physicochemical processes of oxygen generation and carbon dioxide scrubbing under variable conditions, load factors, and component degradation. The presented results allow us to conclude that the capability for automatic reconfiguration of the prototype optimises system resources by maintaining high efficiency and resilience under critical conditions.

Keywords: digital twin, systems approach, life support systems, physicochemical regeneration processes

For citation: Kulikovskikh I.M. Digital twin of regenerative processes in life support systems. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184074>

Введение

Системы жизнеобеспечения критически важных сред, таких как космические объекты [1-3] или отделения интенсивной терапии [4-6], включают в себя набор датчиков, исполнительных и управляющих механизмов, взаимодействующих в

составе отдельных компонентов на уровне различных подсистем, которые должны работать согласованно для поддержания стабильных и безопасных условий среды. Незначительные отклонения в одном компоненте могут привести к каскадным последствиям [7]. Следовательно, требуется надежный инструмент мониторинга и прогнозирования, который позволяет выявлять неисправности и моделировать сценарии влияния на подсистемы, проводя упреждающие корректировки для предотвращения каскадных эффектов.

Данную потребность можно удовлетворить путем создания *цифрового двойника*, назначением которого является управление и оптимизация сложных систем за счет создания их виртуальных представлений [8-10]. В отличие от традиционного моделирования, цифровой двойник объединяет математические модели, описывающие физический аналог, и данные реального наблюдения, отражающие его текущее состояние, прогнозируя возможные проблемы и принимая упреждающие меры в реальном времени. Однако реализация цифрового двойника имеет смысл, если она позволяет компенсировать риски при принятии критических решений доступными в системе ресурсами.

Постановка задачи

Основная сложность в создании цифрового двойника – необходимость постоянного изменения уровня детализации описания физического объекта в широком диапазоне пространственных и временных шкал [11, 12]. Это связано с необходимостью разрешения компромисса между компактностью реализации цифрового решения и точностью воспроизведения его физического аналога. Высокий уровень детализации обеспечивает более высокую точность, но требует существенных затрат на выполнение вычислений, моделирование сценариев и построение прогнозов. Высокий уровень абстракции не гарантирует высокой точности, но и не нуждается в значительных вычислительных мощностях. Как результат, в подсистемах могут использоваться модели разной точности и мультимодальные данные из разных источников, зарегистрированные с различной

частотой, которые должны быть синхронизированы между собой. Рассмотрим основные факторы, которые важно учесть при разработке прототипа.

В автономных системах, к которым относятся системы жизнеобеспечения, доступ к облачным инфраструктурам не всегда возможен [11, 13]. Как следствие, весь рабочий процесс – от сбора данных до вычислений, прогнозов и действий – выполняется на периферийных или встроенных устройствах. Если использование облачной инфраструктуры возможно, необходимо соблюдать требования к полосе пропускания и задержке отклика для обеспечения непрерывного потока данных с необходимой частотой. Такие условия, наряду с нормативными требованиями к безопасности и сохранности передаваемых данных [14], резко ограничивают пространство возможных реализаций цифровых двойников, которые должны справляться с решением поставленной задачи и удовлетворять техническим требованиям и нормативным актам.

В процессе апробации конкретной модели цифрового двойника различают множество неявных факторов, которые влияют на оценку ее целесообразности [9, 11, 14]: временные или постоянные изменения в физическом аналоге, в сборе данных, их зашумленности, в распределении данных, используемых для синхронизации физического аналога и его цифрового двойника, в изменении постановки задачи. Важным фактором является неуместное использование технологий искусственного интеллекта, которые ориентированы на максимизацию эффективности в среднем, что может привести к большим ошибкам при возникновении редких событий. Данные факторы приводят к накоплению ошибок, повышают риски и требуют разработки методов количественной оценки неопределенностей [9, 11].

Известны решения, связанные с анализом применимости системного [2, 15], объектно-ориентированного [16], модельно-ориентированного [17] и вероятностного [9] подходов при реализации цифровых двойников, разработкой адаптивных методов оценивания характеристик цифровых моделей [18], оптимизацией операционных затрат [19], оптимизацией регенерационных систем [20] в управлении жизнеобеспечением космических объектов. В данной работе предлагается прототип цифрового двойника процессов регенерации в системах жизнеобеспечения,

построенного на анализе текущих оценок характеристик процессов. В отличие от мониторинга процессов в системе, имеющей заданную структуру и адаптивные параметры, текущие оценки в разработанном прототипе используются для автоматического изменения его конфигурации в реальном времени, которая позволяет оптимизировать используемые в системе ресурсы за счет поддержания высокой эффективности и устойчивости в критических условиях.

Описание прототипа

Разработанный прототип нацелен на установление баланса между компактностью представления и точностью описания реальных процессов и базируется на ключевых принципах организации сложных систем:

1. *Абстрагирование* управляет переходами от одного уровня абстракции к другому при описании процессов в зависимости от стабильности работы системы, повышения эффективности использования вычислительных ресурсов.
2. *Модульность* заменяет компоненты системы, если уровень деградации достигает заданного предела, обеспечивая «сброс» или обновления деградировавших компонентов без моделирования их точных процессов износа и восстановления.
3. *Декомпозиция* изолирует и разрешает проблемы на уровне компонентов, обеспечивая целевую диагностику и точечные корректировки, которые повышают эффективность использования ресурсов и масштабируемость.
4. *Итерация* имитирует рабочие сценарии в реальном времени, внося динамические коррективы в конфигурацию системы.

На рис. 1 приведена структура и описаны функции прототипа цифрового двойника, построенные на основе данных принципов и включающие систему (сплошная линия), подсистемы (штриховая линия) и компоненты (пунктирная линия).

Представленные принципы организации сложных систем способствуют снижению уровня неопределенности в системе и играют роль механизмов автоматической пересборки прототипа. В таблице 1 описаны основные характеристики механизмов автоматической пересборки прототипа.

Вычислительные эксперименты

Эффективность разработанного прототипа оценивалась проведением серии вычислительных экспериментов, нацеленных на сравнение двух режимов работы: с заданной структурой, выполняющей непрерывный мониторинг текущих параметров (без автоматической пересборки), и с изменяющейся конфигурацией в зависимости от текущего состояния среды (с автоматической пересборкой). Критерием сравнения являлась эффективность работы подсистем очистки CO_2 и выработки O_2 в изменяющихся условиях среды: температуры, давления, уровня CO_2 и допустимого уровня O_2 .

Описание среды. Процессы регенерации в системах жизнеобеспечения описываются дифференциальными уравнениями, которые моделируют химические и биологические реакции в изменяющихся условиях.

Система управления процессом пересборки прототипа

Функции: контроль и мониторинг подсистем очистки CO₂ и генерации O₂

Абстрагирование, Итерация

Подсистема очистки CO₂

Функции: удаляет CO₂ на основе текущего уровня CO₂ и условий среды

Модульность, Декомпозиция

Фактор деградации

Функции: отслеживает эффективность и снижает уровень очистки со временем

Условия среды

Функции: регулирует эффективность очистки в зависимости от внешних условий (температура, давление и т.д.)

Подсистема генерации O₂

Функции: генерирует O₂ на основе уровня CO₂ и допустимого уровня O₂

Модульность, Итерация

Фактор деградации

Функции: отслеживает эффективность и снижает уровень генерации со временем

Допустимый уровень

Функции: подстраивает уровень O₂ под потребности в очистке CO₂

Подсистема регистрации результатов

Функции: измеряет количественные характеристики и регистрирует варианты пересборки в реальном времени

Итерация

Метрики

Функции: регистрирует уровни очистки CO₂, генерации O₂ и кумулятивную эффективность прототипа

Варианты пересборки

Функции: отмечает переходы между уровнями описания, замены модулей, источники потерь, оценивание сценариев

Рис. 1. Структура и функции прототипа цифрового двойника

Таблица 1. Основные характеристики механизмов пересборки прототипа

	Абстрагирование	Модульность	Декомпозиция	Итерация
Фокус	Агрегированное представление	Многократное использование отдельных компонентов	Детальное описание на уровне компонентов	Циклическое оценивание
Назначение	Автоматическое регулирование уровня детализации описания по мере необходимости	Инкапсуляция функций для повторного использования и независимого оценивания	Углубленный анализ каждого компонента на разных уровнях	Постоянное или периодическое отслеживание изменений и реакций системы
Реализация	Задаёт уровни детализации (система, подсистема, компонент), регулируя сложность описания	Создаёт отдельные модули для каждого компонента и подсистемы, гарантируя, что каждый модуль разрабатывается и тестируется независимо	Реализует иерархическую структуру для разбиения системы на более мелкие, управляемые части, часто с использованием функций и подпроцессов	Реализует циклы, которые требуют регулярных, повторяющихся проверок для отслеживания прогресса
Оценивание	Совокупные показатели, например, эффективность работы системы	Независимые показатели отдельных компонентов, которые совмещаются при взаимодействии компонентов	Показатели для конкретных компонентов, например, скорость деградации	Временные показатели, фиксирующие изменения на каждой итерации или цикле

Применение	Необходима вычислительная эффективность	Необходимы гибкость и масштабируемость	Необходим анализ первопричин или устранение неполадок	Требуется отслеживание изменений в динамике
-------------------	---	--	---	--

При моделировании среды, в целях упрощения интерпретации влияния автоматической пересборки на результаты вычислительных экспериментов, дифференциальные уравнения были заменены на дискретные правила обновления в соответствии со следующими допущениями:

1. В реальных средах модули очистки CO₂ и генерации O₂ деградируют из-за химического износа, тепловых эффектов и усталости материалов. Данные процессы были учтены в виде факторов деградации и пороговых значений.
2. В реальных условиях регенеративные процессы включают в себя непрерывные реакции и контуры обратной связи, которые адаптируются к изменениям нагрузки, температуры и давления в режиме реального времени. При моделировании среды использовался набор правил и пороговых значений для описания непрерывной динамики.

Хотя моделируемая среда не имитирует непрерывную динамику, которую дают дифференциальные уравнения, использование механизмов автоматической пересборки – *абстрагирование, модульность, декомпозиция и итерация*, что является особенностью разработанного прототипа, позволяет частично имитировать динамику, наблюдаемую в процессах регенерации.

Ниже приведены результаты вычислительных экспериментов для апробации прототипа с автоматической пересборкой и без нее. Динамические изменения среды моделировались в виде случайных колебаний температуры – $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, давления – $1\text{ atm} \pm 0.01\text{ atm}$, доли CO₂ – $0.005\text{ ppt} \pm 0.0005\text{ ppt}$ и нагрузки на систему – 20 % [21]. Количество итераций – 500. Прототип реализован на языке Python, объем программы – 17 кб. В таблице 2 приведены результаты сравнения режимов работы на основе

усредненных оценок долей газов, на рис. 2 – изменения в динамике регенерации газов с итерациями.

Таблица 2. Усредненные оценки

Усредненная оценка	С пересборкой, ppt	Без пересборки, ppt
Доля очищенного CO ₂	0.005032	0.004609
Доля сгенерированного O ₂	0.002276	0.002083

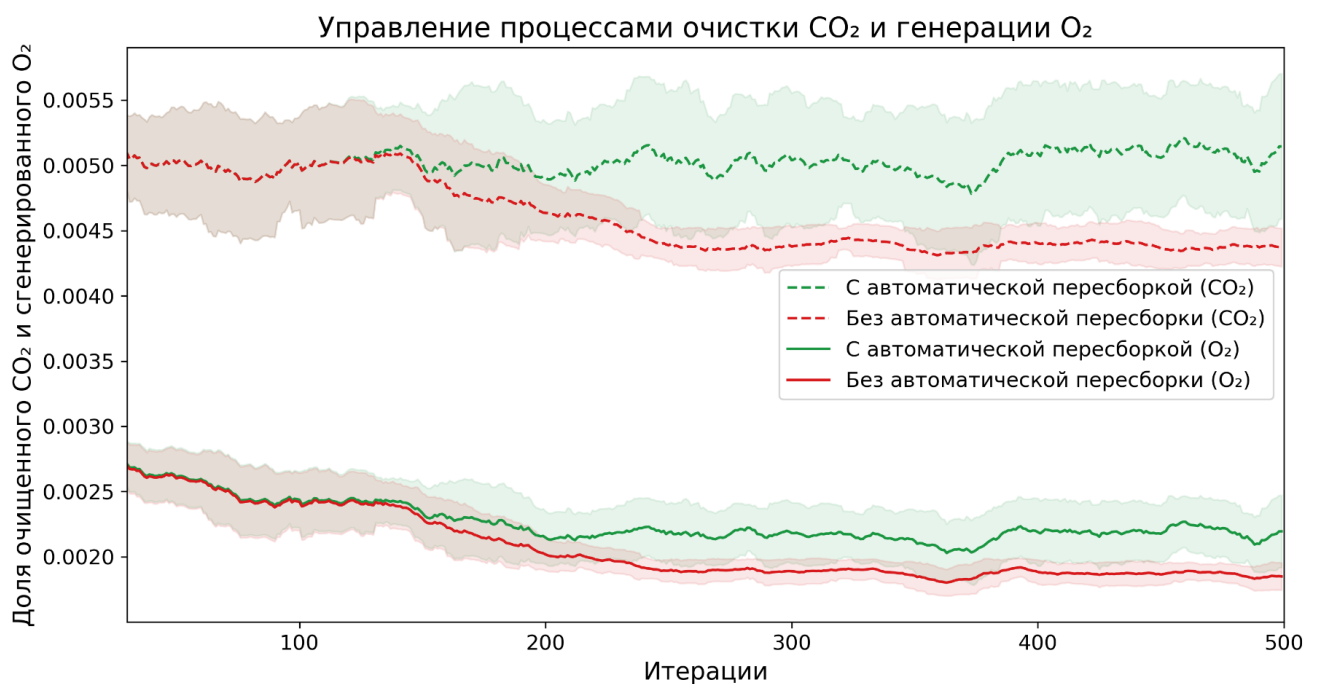


Рис. 2. Результаты вычислительного эксперимента

Незначительное снижение средних значений с течением времени является ожидаемым в постепенно деградирующих подсистемах. При этом результаты демонстрируют более высокие оценки доли очищенного и сгенерированного газов для режима с автоматической пересборкой, что указывает на эффективность разработанного прототипа, который позволяет обеспечить более высокую устойчивость к изменениям среды и нагрузки, а также деградации модулей очистки CO₂ и генерации O₂.

Выводы

В работе приведено описание разработанного прототипа цифрового двойника процессов регенерации в системах жизнеобеспечения. Отличительной особенностью разработанного прототипа является возможность автоматического изменения его конфигурации в реальном времени на основе текущих оценок, что позволяет поддерживать высокую эффективность и устойчивость в критических условиях. Результаты вычислительных экспериментов подтвердили целесообразность разработанного прототипа в управлении физико-химическими процессами очистки диоксида углерода и генерации кислорода. Дальнейшие исследования связаны с описанием более сложных сценариев, оценкой временных затрат на пересборку и оптимизацию рабочих процессов.

Список источников

1. Сычев В.Н. Биологические системы жизнеобеспечения человека – прошлое, настоящее, будущее. М.: ИМБП РАН, 2021. URL: <http://www.imbp.ru/webpages/win1251/News/2021/Sychev.pdf>
2. Зарецкий Б.Ф., Курмазенко Э.А., Прошкин В.Ю. Управление жизнеобеспечением экипажей космических объектов: системный подход // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118179>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-13](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-13)
3. Курмазенко Э.А., Кирюшин О.В., Кочетков А.А., Прошкин В.Ю., Цыганков А.С., Сорокин А.Е., Ведищев А.С. Оценка эффективности регенерационной системы жизнеобеспечения межпланетных пилотируемых аппаратов // Пилотируемые полеты в космос. 2020. № 2 (35). С. 99-113. DOI: [10.34131/MSF.20.2.99-113](https://doi.org/10.34131/MSF.20.2.99-113)
4. Katsoulakis E., Wang Q., Wu H. et al. Digital twins for health: a scoping review // npj Digital Medicine. 2024. No. 7 (77). URL: <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01073-0>
5. Mol C.G., Vieira A.G.D.S., Garcia B.M.S.P. et al. Closed-loop oxygen control for patients with hypoxaemia during hospitalisation: a living systematic review and meta-analysis protocol // BMJ Open. 2022. No. 12 (12). P. 062299. DOI: [10.1136/bmjopen-2022-062299](https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-062299)

6. Гаранин А.А., Рубаненко А.О., Шипунов И.Д., Рогова В.С. Методики измерения частоты дыхания, основанные на анализе движений грудной клетки // Наука и инновации в медицине. 2023. № 8 (4). С. 251-258. DOI: [10.35693/2500-1388-2023-8-4-251-258](https://doi.org/10.35693/2500-1388-2023-8-4-251-258)
7. Juan C. Rocha et al. Cascading regime shifts within and across scales // Science. 2018. No. 362. P. 1379-1383. DOI: [10.1126/science.aat7850](https://doi.org/10.1126/science.aat7850)
8. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с.
9. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. The National Academies Press, 2023. DOI: [10.17226/26894](https://doi.org/10.17226/26894)
10. Digital Twin: Definition & Value – An AIAA and AIA Position Paper, 2021. URL: <https://www.aia-aerospace.org/publications/digital-twin-definition-value-an-aiaa-and-aia-position-paper/>
11. Willcox K., Segundo B. The role of computational science in digital twins // Nature Computational Science. 2024. No. 4. P. 147–149. DOI: [10.1038/s43588-024-00609-4](https://doi.org/10.1038/s43588-024-00609-4)
12. Niederer S.A., Sacks M.S., Girolami M. et al. Scaling digital twins from the artisanal to the industrial // Nature Computational Science. 2021. No. 1. P. 313–320. DOI: [10.1038/s43588-021-00072-5](https://doi.org/10.1038/s43588-021-00072-5)
13. Ferrari A., Willcox K. Digital twins in mechanical and aerospace engineering // Nature Computational Science. 2024. No. 4. P. 178–183. DOI: [10.1038/s43588-024-00613-8](https://doi.org/10.1038/s43588-024-00613-8)
14. Tao F., Zhang H., Zhang C. Advancements and challenges of digital twins in industry // Nature Computational Science. 2024. No. 4. P. 169–177. DOI: [10.1038/s43588-024-00603-w](https://doi.org/10.1038/s43588-024-00603-w)
15. Куликов Г.Г., Ризванов К.А., Иванов А.В., Шукалюк В.А. Трансформация автоматизированной информационно-управляющей системы построения системных математических моделей ГТД в форму цифровых двойников // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177673>

16. Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175930>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)
17. Цымбал М.Р., Семичастнов А.Е., Балакин Д.А., Удалов Н.Н. Разработка цифрового двойника наземной радионавигационной системы по принципам модельно-ориентированного проектирования с помощью математической среды моделирования Engée // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180679>
18. Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Метод оценивания характеристик цифровых моделей киберфизических систем на основе множественного регрессионного анализа результатов их применения // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175925>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-19)
19. Гусев П.Ю. Оптимизация операционных затрат в многофункциональной цифровизированной системе на основе результатов предиктивной аналитики на примере авиастроительного предприятия // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181896>
20. Беркович Ю.А., Шалопанова О.А., Буряк А.А. Оптимизация системы освещения растений, обеспечивающей стабилизацию концентрации кислорода в газовой среде, в модели биолого-технической системы жизнеобеспечения с экипажем // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. № 56 (5). С. 102-110. DOI: [10.21687/0233-528X-2022-56-5-102-110](https://doi.org/10.21687/0233-528X-2022-56-5-102-110)
21. Human integration design handbook. NASA, 2015. URL: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/03/human_integration_design_handbook_revision_1.pdf

References

1. Sychev V.N. *Biologicheskie sistemy zhizneobespecheniya cheloveka – proshloe, nastoyashchee, budushchee* (Biological life support systems for humans – past, present, future). Moscow: IMBP RAN Publ., 2021. URL: <http://www.imbp.ru/webpages/win1251/News/2021/Sychev.pdf>

2. Zaretskii B.F., Kurmazenko E.A., Proshkin V.Yu. Spacecraft crew life support control: systems approach. *Trudy MAI*. 2020. No. 113. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118179>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-13](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-13)
3. Kurmazenko E.A., Kiryushin O.V., Kochetkov A.A., Proshkin V.Yu., Tsygankov A.S., Sorokin A.E., Vedishchev A.S. Performance evaluation of the regenerative life support system of interplanetary manned spacecraft. *Pilotiruemye polety v kosmos*. 2020. No. 2 (35). P. 99-113. (In Russ.). DOI: [10.34131/MSF.20.2.99-113](https://doi.org/10.34131/MSF.20.2.99-113)
4. Katsoulakis E., Wang Q., Wu H. et al. Digital twins for health: a scoping review. *npj Digital Medicine*. 2024. No. 7 (77). URL: <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01073-0>
5. Mol C.G., Vieira A.G.D.S., Garcia B.M.S.P. et al. Closed-loop oxygen control for patients with hypoxaemia during hospitalisation: a living systematic review and meta-analysis protocol. *BMJ Open*. 2022. No. 12 (12). P. 062299. DOI: [10.1136/bmjopen-2022-062299](https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-062299)
6. Garanin A.A., Rubanenko A.O., Shipunov I.D., Rogova V.S. Methods for measuring respiratory rate based on the analysis of chest wall movements. *Nauka i innovatsii v medicine*. 2023. No. 8 (4). P. 251-258. (In Russ.). DOI: [10.35693/2500-1388-2023-8-4-251-258](https://doi.org/10.35693/2500-1388-2023-8-4-251-258)
7. Juan C. Rocha et al. Cascading regime shifts within and across scales. *Science*. 2018. No. 362. P. 1379-1383. DOI: [10.1126/science.aat7850](https://doi.org/10.1126/science.aat7850)
8. GOST R 57700.37–2021. *Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoyniki izdelii* (GOST R 57700.37–2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions). Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 15 p.
9. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins*. The National Academies Press, 2023. DOI: [10.17226/26894](https://doi.org/10.17226/26894)
10. *Digital Twin: Definition & Value – An AIAA and AIA Position Paper*, 2021. URL: <https://www.aia-aerospace.org/publications/digital-twin-definition-value-an-aiaa-and-aia-position-paper/>
11. Willcox K., Segundo B. The role of computational science in digital twins. *Nature Computational Science*. 2024. No. 4. P. 147–149. DOI: [10.1038/s43588-024-00609-4](https://doi.org/10.1038/s43588-024-00609-4)

12. Niederer S.A., Sacks M.S., Girolami M. et al. Scaling digital twins from the artisanal to the industrial. *Nature Computational Science*. 2021. No. 1. P. 313–320. DOI: [10.1038/s43588-021-00072-5](https://doi.org/10.1038/s43588-021-00072-5)
13. Ferrari A., Willcox K. Digital twins in mechanical and aerospace engineering. *Nature Computational Science*. 2024. No. 4. P. 178–183. DOI: [10.1038/s43588-024-00613-8](https://doi.org/10.1038/s43588-024-00613-8)
14. Tao F., Zhang H., Zhang C. Advancements and challenges of digital twins in industry. *Nature Computational Science*. 2024. No. 4. P. 169–177. DOI: [10.1038/s43588-024-00603-w](https://doi.org/10.1038/s43588-024-00603-w)
15. Kulikov G.G., Rizvanov K.A., Ivanov A.V., Shukalyuk V.A. Transformation of an automated information and control system for constructing system mathematical models of gas turbine engines in the form of digital twins. *Trudy MAI*. 2023. No. 133. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177673>
16. Kuznetsova S.V., Semenov A.S. Digital twins in the aerospace industry: an object-oriented approach. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175930>. (In Russ.). DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)
17. Tsymbal M.R., Semichastnov A.E., Balakin D.A., Udalov N.N. Development of a digital twin of a ground-based radio navigation system based on the principles of model-oriented design using the mathematical modeling environment Engee. *Trudy MAI*. 2024. No. 136. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180679>
18. Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaichenko P.Yu. A method for estimating the characteristics of digital models of cyber-physical systems based on multiple regression analysis of the results of their application. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175925>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-19)
19. Gusev P.Yu. Optimization of operating costs in a multifunctional digitalized system based on the results of predictive analytics using the example of an aircraft manufacturing enterprise. *Trudy MAI*. 2024. No. 137. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181896>
20. Berkovich Yu.A., Shalopanova O.A., Buryak A.A. Optimization of the plant illumination system stabilizing oxygen concentration in the gas medium within a prototyped

biotechnical crew life support system. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2022. No. 56 (5). P. 102-110. (In Russ.). DOI: [10.21687/0233-528X-2022-56-5-102-110](https://doi.org/10.21687/0233-528X-2022-56-5-102-110)
21. *Human integration design handbook*. NASA, 2015. URL: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/03/human_integration_design_handbook_revision_1.pdf

Статья поступила в редакцию 20.11.2024

Одобрена после рецензирования 24.11.2024

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 20.11.2024; approved after reviewing on 24.11.2024;
accepted for publication on 25.04.2025