

УДК 004.942:658.51:629.5

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Долматов М.А., Плотников А.М., Рындин А.А. (Санкт-Петербург)  
Девятков Т.В. (Казань)

### Введение

Применение методов имитационного моделирования при анализе процессов функционирования производственных систем требует решения вопроса представления получаемых результатов в виде, удобном для конечного пользователя. Особенно актуальным это стало в последнее время, поскольку происходящая в настоящее время цифровая трансформация отраслей промышленности накладывает новые требования не только к методам и инструментам решения задач [1], но и к средствам и форматам представления результатов.

К традиционным способам представления результатов можно отнести таблицы, круговые диаграммы, столбчатые диаграммы, линейные графики и т.п. С определенного времени, когда со стороны пользователей прикладного программного обеспечения для создания имитационных моделей возросли запросы в получении результатов моделирования в ином формате – с использованием средств трехмерной визуализации, ведущие зарубежные компании-разработчики стали включать в состав средств разработки моделей компоненты для трехмерного представления результатов [2]. Однако в составе отечественных программ имитационного моделирования средства трехмерной визуализации до последнего времени развивались относительно медленно.

Для ликвидации имеющегося технологического отставания и в целях импортозамещения ушедших с российского рынка зарубежных компаний поставщиков продуктов для имитационного моделирования в 2021 г. было создано программное решение – модуль визуализации. Модуль входит в состав специализированного приложения для автоматизации создания имитационных моделей судостроительных производств и проведения на них экспериментов АС «Сириус» 2.0.

Модуль функционирует на базе платформы Unity и обеспечивает формирование упрощенной трехмерной визуализации полученных результатов имитационного моделирования для воспроизведения детального процесса строительства судовых заказов верфи и отслеживания влияния изменения исходных данных на функционирование производственной системы.

Разработка модуля выполнялась специалистами АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» (Санкт-Петербург) совместно с компанией ООО «Элина-Компьютер» (Казань). Права на программное решение принадлежат АО «ЦТСС».

Учитывая постоянно растущие со стороны потенциальных потребителей требования к качеству визуализации, в период 2022-2023 гг. была выполнена апробация разработанного модуля для поиска вариантов улучшения качества визуализации результатов имитационного моделирования за счет применения трехмерных данных в составе BIM-моделей [3].

BIM-модели уже достаточно давно активно применяются в различных отраслях промышленности. В судостроении применение BIM-технологий стало одним из обязательных условий цифровой трансформации отрасли и реализации концепции «Цифровой верфи» [4, 5, 6].

В последнее время акцент применения BIM-моделей сместился с задач проектирования на задачи эксплуатации проектируемых объектов, в т.ч. технического

обслуживания и ремонта производственных мощностей предприятия (рис.1) [7]. При этом надо учитывать, что к моменту окончания срока эксплуатации объекта возникает снижение интенсивности использования BIM-модели, обусловленное несоответствием содержащихся в ней данных реальному состоянию объекта. Но в случае реконструкции или модернизации объекта интенсивность использования BIM-модели восстанавливается.

Созданная и поддерживаемая в актуальном состоянии BIM-модель может быть использована и для решения других задач, например, для визуализации результатов имитационного моделирования.

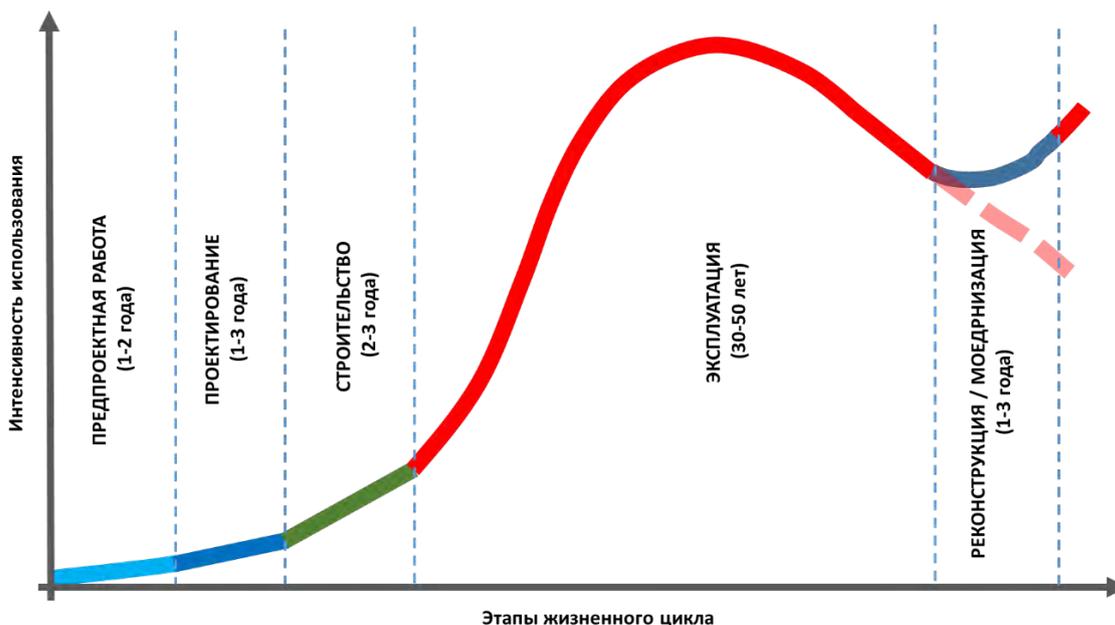


Рис. 1. Использование BIM-моделей на разных этапах жизненного цикла

### Материалы и методы решения задач, принятые допущения

Визуализация представляет процессы перемещения сборочных единиц (СЕ), сборочно-монтажных единиц (СМЕ) и строящихся изделий на планировке предприятия. При этом должна быть обеспечена соразмерность всех отображаемых элементов.

Для каждого визуализируемого элемента должно быть предварительно указано его соответствие с трехмерными моделями (примитивами), автоматическую загрузку которых модуль выполняет при непосредственной генерации визуализации.

Генерация трехмерной визуализации выполняется разработанным программным модулем на основе специального журнала моделирования, формируемого приложением АС «Сириус» 2.0 после прогона имитационной модели, условной планировки предприятия, базы данных трехмерных моделей (примитивов), описывающих строящиеся заказы и все их сборочные и сборочно-монтажные единицы.

Визуализация строительства заказа на основе предварительно подгруженных моделей СЕ и СМЕ позволяет обеспечить полноценное отображение процесса формирования корпуса заказа.

Журнал моделирования содержит укрупненное описание всех производственных операций во внутреннем формате. Для автоматизации процесса анимации были использованы ранее разработанные визуальные модули [8], которые сохраняют все события в процессе моделирования, необходимые для формирования анимации. Записи

в журнале моделирования содержат в формализованном формате также информацию об объектах, их состоянии или произведенных над ними действиях.

Сценарий поведения (перечень состояний) каждого объекта в составе визуализации, включая СЕ и СМЕ, которые формируют более крупные сборочные единицы (блоки и корпус заказа), складывается на основе информации, содержащейся в журнале моделирования.

Фактически каждый анимируемый объект (СЕ или СМЕ) в процессе визуализации имеет свой жизненный цикл, сформированный в ходе прогона модели и сохраненный в журнале моделирования. Так как результат прогона имитационной модели на языке GPSS World Core является логом симуляции системы массового обслуживания, то каждая запись содержит описание событий, происходящих с объектами отображения. Такими событиями могут быть:

- G – generate (появление нового объекта в анимации);
- J – job (выполнение работы на указанной точке в 3D-окружении);
- M – move (перемещение объекта из точки старта в точку адресат);
- D – destroy (удаление объекта из анимации);
- WI – warehouse init (объявление начального объема заполнения склада);
- W – warehouse (объявление изменения состояния объема склада);
- F – facility (объявление устройства обработки и его состояния доступности);
- QE – queue enter (занятие объектом очереди);
- QL – queue leave (выход объекта из очереди);
- и т.д.

При этом каждый объект пополняется данными о его жизненном цикле, и в каждый момент времени можно легко определить, какой объект должен быть скрыт или добавлен и в каком конкретно месте виртуального окружения и какое состояние он должен иметь в этот момент. Также возможно сформировать и вывести в виде сообщения информацию о его состоянии.

На рис. 2 приведен пример интерпретации фрагмента журнала моделирования.

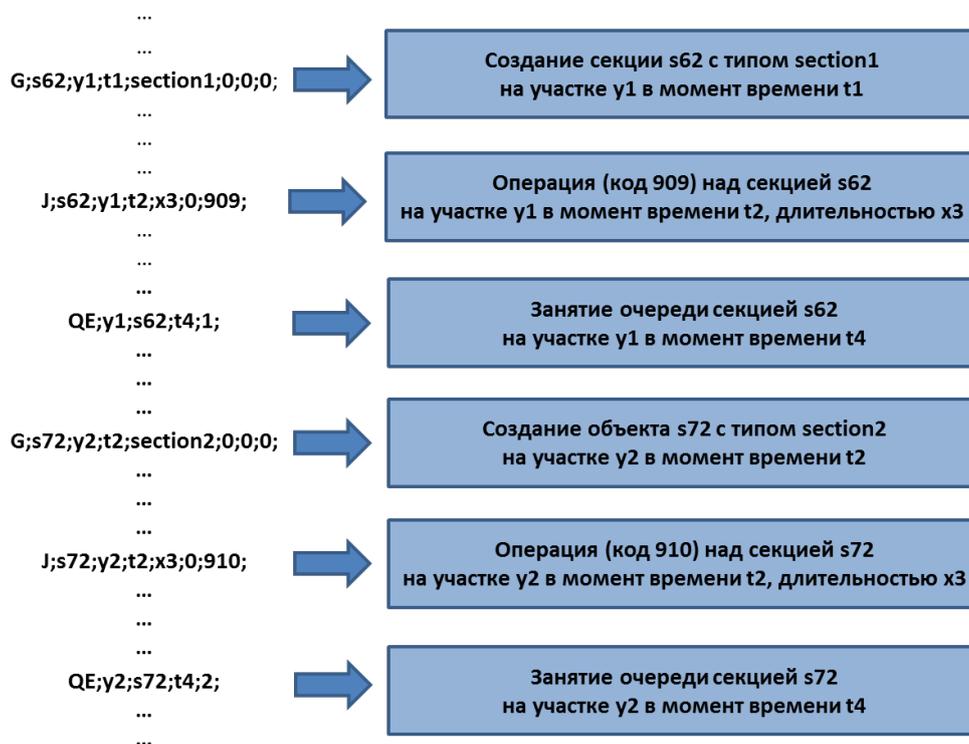


Рис. 2. Интерпретация журнала моделирования

На основе информации о текущем состоянии каждого элемента определяется порядок формирования отдельных частей (блоков, строительных районов) заказа и/или корпуса заказа целиком. Что впоследствии позволяет пользователю в произвольный момент времени фиксировать «прогресс» исполнения производственной программы одновременно с демонстрируемой пользователю визуализацией.

В текущей версии созданного программного модуля реализованы следующие функциональные возможности:

- произвольное перемещение камеры пользователя в виртуальном пространстве по макету моделируемого судостроительного производства;
- задание прозрачности или отключения/включения отдельных элементов макета (крыш и стен зданий, внутренних колонн и т.п.);
- возможность произвольного выбора для просмотра временного периода посредством слайдера.

Просмотр созданной визуализации может выполняться пользователем как на мониторе ПК, так и с использованием шлемов виртуальной реальности. При этом пользователь может осуществлять взаимодействие с приложением посредством стандартных средств (клавиатуры и мыши) или при помощи контроллеров шлема виртуальной реальности.

Основными целями апробации являлись:

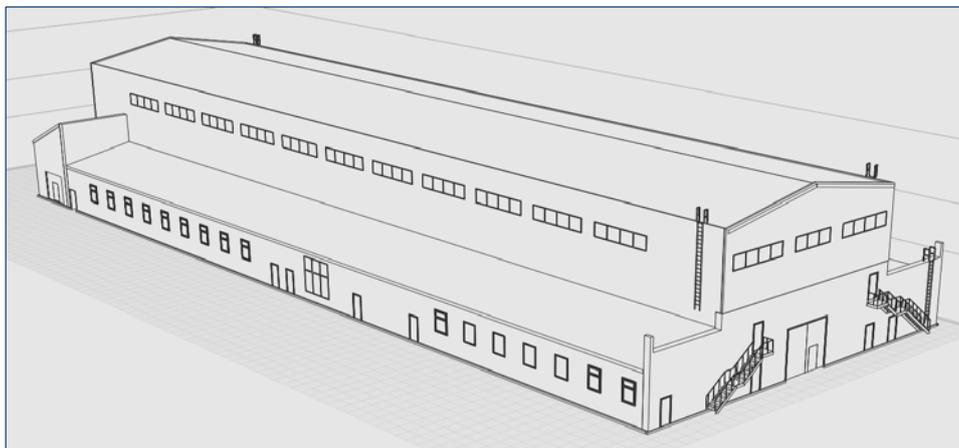
- выбор оптимальных форматов для экспорта/импорта трехмерных данных;
- выявление ограничений передаваемых моделей;
- определение необходимости проведения дополнительных работ или дополнительных ресурсов для обеспечения визуализации требуемого качества.

В качестве исходных данных для апробации были использованы BIM-модели производственных зданий и сооружений одного из судостроительных предприятий северо-западного региона России. Эти модели разработаны компанией ООО «Бюро ЕСГ» (Санкт-Петербург) в рамках договора с АО «ЦТСС» [9].

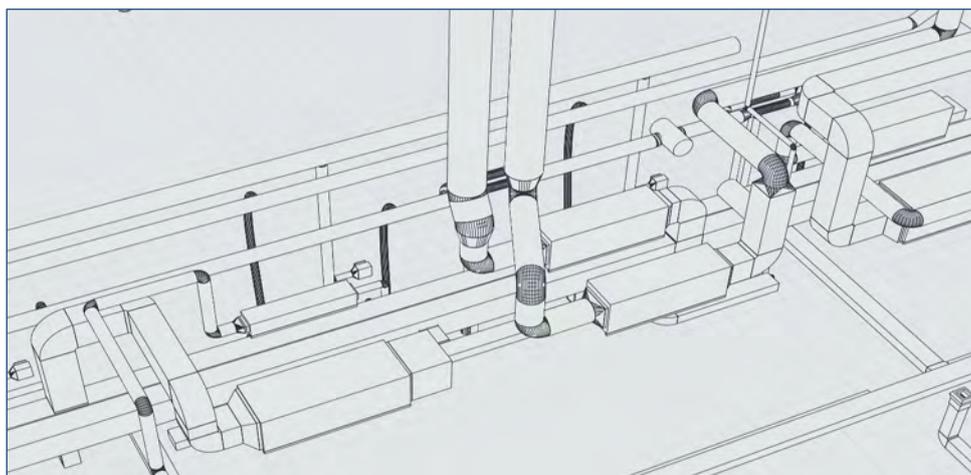
BIM-модели помимо архитектурных элементов, инженерных систем, оборудования и межцеховых коммуникаций (рис. 3) содержат наборы параметров для каждого объекта, используемые в деятельности инженерных подразделений предприятий, занятых обслуживанием производственной инфраструктуры. Доступ к параметрам каждого элемента реализуется через специальный интерфейс с информационной системой предприятия.

Исходными данными для моделирования являлась рабочая и исполнительная документация производственной инфраструктуры, данные об оборудовании (спецификации и паспорта), полученные непосредственно с предприятия.

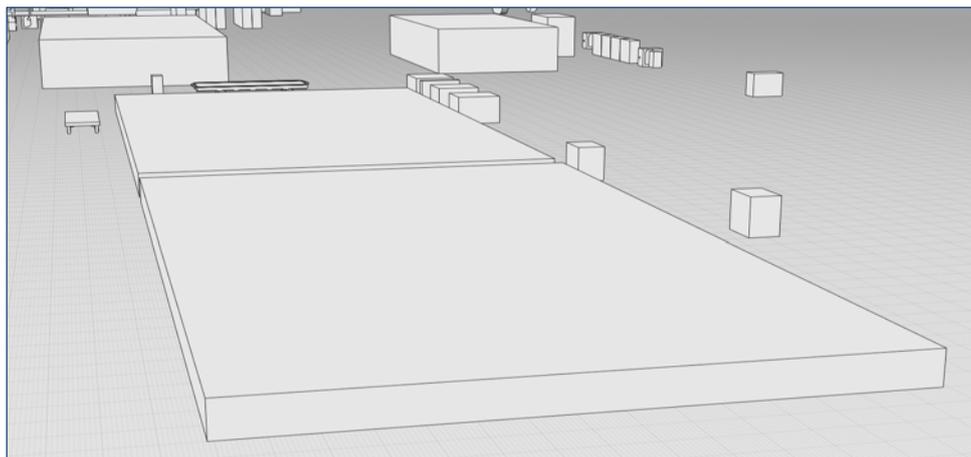
Степень детализации для большинства элементов BIM-модели выбиралась, исходя из решаемых задач. Так, для модернизации, ремонта и обслуживания систем отопления, вентиляции и электрических сетей достаточной детализацией является уровень LOD-300. Подобный подход был выбран и для определения степени детализации оборудования. Для визуализации процессов производства достаточно привязки по координатам к внутреннему пространству цеха и его геометрических размеров. Для обеспечения данными пользователей производственных и инженерных подразделений предприятия предназначен набор технологических и эксплуатационных параметров. В связи с этим степень детализации разделов оборудования была принята LOD-150 – LOD-200. При этом отдельные 3D-модели оборудования восстанавливались по чертежам (рисункам) и иным данным.



а)



б)



в)

Рис. 3. Модели объектов в составе BIM-модели (фрагмент)  
а) здание цеха; б) система вентиляция; в) технологическое оборудование

### Результаты

В ходе апробации была решена задача конвертации BIM-моделей, полученных из исходной среды проектирования в формат, поддерживаемый средой виртуальной реальности. Исходным форматом BIM-моделей являлся формат IFC.

Экспорт BIM-моделей выполнялся с разбиением их на части, каждая из которых содержала отдельные блоки данных о:

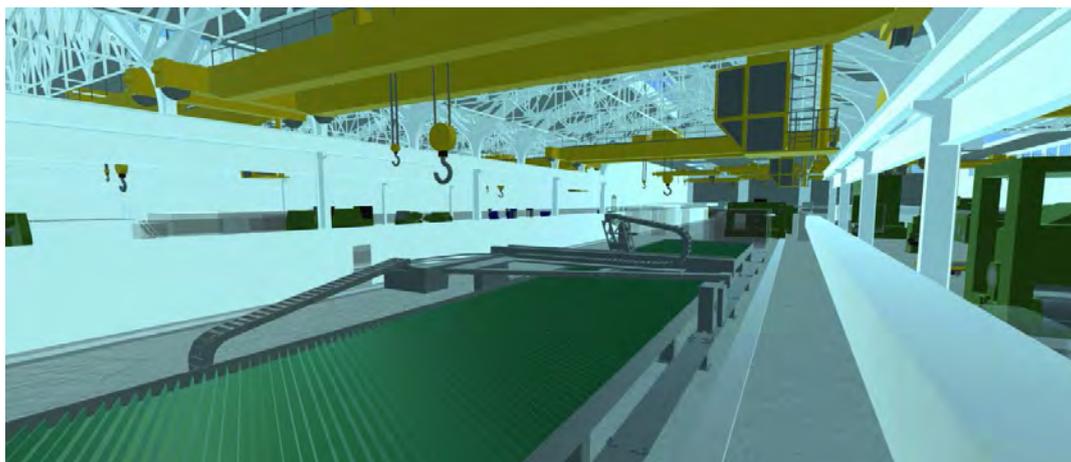
- конструкциях зданий и сооружений;
- размещенных в зданиях (цехах) инженерных системах (вентиляция, водоснабжение, электрика и т.п.);
- технологическом, транспортном и крановом оборудовании.

Конвертация выполнялась в среде CAD системы Renga [10]. В качестве возможных форматов экспорта из перечня доступных были выбраны форматы FBX и OBJ.

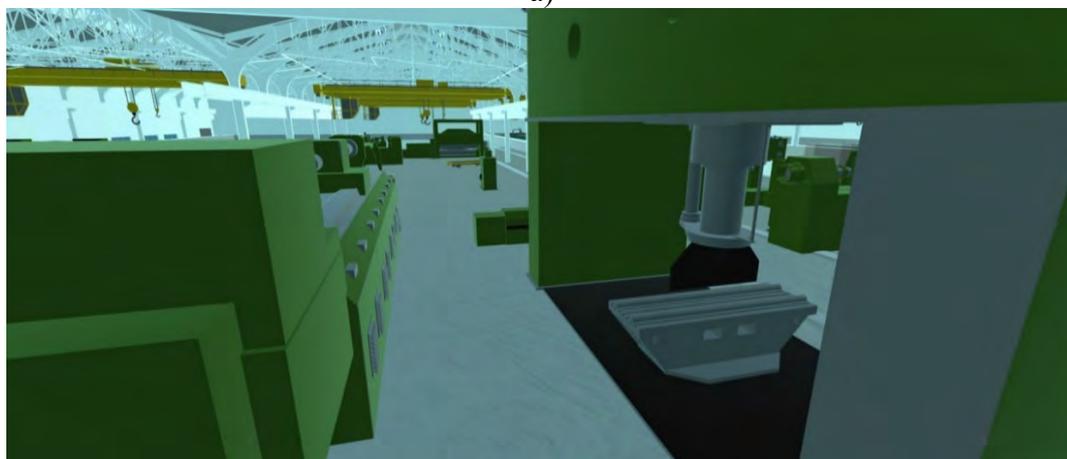
По результатам апробации было выполнено сравнение моделей, получаемых в результате экспорта в вышеуказанные форматы. Сравнение показало, что экспорт в формат OBJ позволяет получить более оптимизированные по размеру трехмерные модели по сравнению с FBX без потери качества. Это в конечном итоге позволит увеличить производительность при выполнении визуализации за счет снижения размера моделей, включенных в демонстрируемый пользователю трехмерный макет производства.

Поскольку часть моделей технологического и кранового оборудования была изначально смоделирована в BIM-модели укрупненно, после импорта она была заменена с использованием библиотеки трехмерных моделей оборудования, имеющихся у АО «ЦТСС» и использованных ранее при создании интерактивных трехмерных макетов производственных систем судостроительных предприятий.

Пример такой доработанной модели приведен на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Модели производственных участков (после замены моделей оборудования):  
а) участок термической резки; б) участок гибки

Для проверки производительности модуля была проведена серия нагрузочных тестов, которые показали достаточно высокую производительность (не менее 90 кадров в секунду) при единовременной визуализации около ста тысяч элементов при условии анимации отдельных объектов.

Технологии виртуальной реальности для визуализации результатов BIM-моделирования ранее уже широко применялись для представления проектных решений на этапах проектирования промышленных объектов [11]. Кроме того, предпринимались попытки расширения возможностей BIM для решения задач управления строительством, а именно планированием строительной деятельности, – посредством интеграции со специализированными программными комплексами, обеспечивающими решение задач управления ресурсами [12].

### **Выводы**

В результате апробации созданного программного решения совместно с результатами BIM-моделирования удалось подтвердить возможность перехода на качественно новый уровень в визуализации результатов имитационного моделирования, выбран оптимальный формат для конвертации данных и выявлены имеющиеся ограничения. Обязательным условием применимости предложенного решения является наличие у судостроительного предприятия постоянно актуализируемых BIM-моделей всех объектов производственной инфраструктуры, созданных с достаточно высокой степенью детализации.

Описанный подход к решению задачи визуализации результатов имитационного моделирования используется впервые в российском судостроении. Учитывая его универсальность, он может быть применен при создании имитационных моделей предприятий машиностроения и других отраслей промышленности, функционирование которых может быть описано дискретно-событийными моделями [13]. При этом необходимо понимать, что визуализация является лишь дополнением, а основным результатом моделирования является выводимая одновременно с визуализацией производственная статистика, предоставляемая пользователю в требуемом ему виде и объеме, достаточном для анализа и оценки производственных процессов и состояния строящихся на предприятии заказов.

Разработанное программное решение в составе отечественной платформы для создания имитационных моделей АС «Сириус» 2.0 в комплексе с данными BIM-моделирования позволяет решить задачу импортозамещения зарубежных программных систем в части имитационного моделирования производственных процессов судостроительных предприятий и визуализации результатов такого моделирования.

Основные направления дальнейших исследований авторов в области визуализации результатов имитационного моделирования следующие:

- исследование возможности прямого импорта BIM-моделей посредством формата IFC без необходимости конвертации через промежуточный формат;
- расширение выводимой в процессе визуализации статистики в части объема и форм ее представления;
- включение (опционально) в состав визуализации перемещений сборочных единиц по территории виртуального макета предприятия с учетом зон действия и параметров используемого транспортного оборудования.

### **Литература**

1. **Бондарь Е.В.** Цифровая трансформация судостроительной отрасли: анализ и оценка в зарубежной и отечественной практике // Вестник СНО ДОННУ. – 2022. – Вып.14. – Том 3: Экономика. – С.35-40.

2. **Мищенко С.Н.** Программные средства визуализации имитационного и математического моделирования // XXVI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2023). Сборник докладов. Санкт-Петербург. 24 – 26 мая 2023 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 449 с. – С.443-446. ISBN 978-5-7629-3198-4.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665608 от 30.09.2021 г.
4. **Середохо В.А., Макеев С.М.** Проект «Цифровая верфь»: создание экосистемы предприятия для развития цифрового производства // Инновации. – 2019. – № 9.
5. **Макеев С., Тучков А., Рындин А.** BIM зданий и сооружений, как один из элементов концепции создания «ЦИФРОВОЙ ВЕРФИ» Средне-Невского судостроительного завода // Сборник тезисов конференции «МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении-2019». – 2019. – №1. – С.76–83.
6. **Макеев С.М., Тучков А.А., Рындин А.А.** Информационное моделирование производственной инфраструктуры судостроительного предприятия // Журнал «Rational Enterprise Management (Рациональное управление предприятием)». – 2019. – # 3. – С.78-81.
7. **Тумакова Анна.** Как интеграторы развивают BIM: состояние рынка, опыт отечественных компаний, комментарии // Интернет-ресурс «ICT-Online.ru». – Дата публикации 12.07.2019. URL: <https://ict-online.ru/analytics/kak-integratory-razvivayut-bim-sostoyanie-rynka-opyt-otechestvennyh-kompaniy-kommentarii-39705> (дата обращения: 13.09.2023).
8. **Девятков Т.В., Девятков В.В., Габалин А.В., Шувалов К.И.** Расширение BIM моделей за счет возможностей имитационного моделирования // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): труды Четырнадцатой международной конференции, 27–29 сентября 2021 г., Москва / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. – Электрон. текстовые дан. (26,1 Мб). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С.452-458. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: Pentium 4; 1,3 ГГц и выше; Internet Explorer; Acrobat Reader 4.0 или выше. – Загл. с титул. экрана. – ISBN 978-5-91450-256-7. № госрегистрации 0322103542. – Текст: электронный.
9. **Долматов М.А., Рындин А.А., Девятков Т.В.** 3D-визуализация имитационных исследований функционирования судостроительных производств на основе BIM-моделей // Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2023). Труды конференции. – СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. – 272 с. – С.76-83.
10. Сайт <https://rengabim.com>.
11. **Козленко Т.А., Придвижкин С.В.** BIM и VR: Разработка программного модуля для интеграции информационного моделирования зданий и виртуальной реальности // Вестник СибАДИ. – 2021. – Том 18. – № 4. – С. 440–449.
12. **Яценко А.А., Слепкова Т.И.** Имитационно-информационная модель при оценке эффективности строительных инновационных процессов // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 10-1. – С. 56-59; URL: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=8506> (дата обращения: 13.09.2023).
13. **Рындин Алексей, Чиковская Ирина, Кириллова Марина, Голованов Дмитрий.** Информационное моделирование предприятий с дискретным типом производства // Журнал «САПР и графика». – июль 2023. – С.6-15.