# Имитационное моделирование на разных стадиях жизненного цикла транспортной системы – что нужно заказчику кроме самой модели?

Топаж А.Г., Таровик О.В., Крестьянцев А.Б.
*ООО «Бюро Гиперборея», Санкт-Петербург*

В докладе описаны перспективные расширения стандартного функционала имитационных моделей, которые оказываются полезными на различных стадиях жизненного цикла транспортной системы-прототипа. Отмечено, что на этапе проектирования формирование входных данных имитационной модели должно производиться в рамках тесной интеграции с системами концептуального проектирования. А на стадии эксплуатации критическую роль приобретает учёт в имитационных моделях механизмов оптимального оперативного управления и планирования, существующих в реальных транспортных системах в виде разнообразных диспетчерских служб.

The report describes promising extensions of the standard functionality of simulation models, which could be useful for various stages of the life cycle of a transport system. It is noted that at the stage of conceptual design of a system, the input data for simulation model should be obtained under the close integration with conceptual CAD/CAE systems. In turn, at the stage of the system operation the supplementary focus in simulation models should be done on the optimal operational control and planning mechanisms that exist in real transportation systems in the form of various dispatch services.

Ключевые слова: имитационная модель, цифровой двойник, жизненный цикл, комбинаторная оптимизация, концептуальное проектирование, транспортная система

Keywords: simulation model, digital twin, life cycle, combinatorial optimization, preliminary design, transportation system

## 1. Введение.

Подход, использующий методы математического моделирования и компьютерной симуляции для комплексного анализа вновь создаваемых или существующих технических систем, давно и прочно занял важное место в инженерной теории и практике. В последнее время для обозначения сложных компьютерных моделей реального инженерного объекта принято использовать модный и отчасти спекулятивный термин Digital Twin или «цифровой двойник» [1]. Частью концепции «цифрового двойника» является имитационная модель –

программа, рассчитывающая на компьютере поведение изучаемой системы в ходе её эксплуатации с течением времени. Подобно тому, как детальная предпроектная проработка конкретного объекта техники (устройства, механизма, судна и т.д.) сначала выполняется на его детальной, но статической цифровой 3D-модели (возможно, с использованием современных технологий дополненной реальности), так и основные динамические эксплуатационные характеристики сложных транспортно-технологических систем могут и должны быть предварительно исследованы с помощью подходящей имитационной модели. Это обусловлено тем, что стоимость построения и анализа компьютерных моделей ничтожно мала по сравнению со стоимостью создаваемой инфраструктуры и возможного ущерба из-за ошибок, допущенных при ее проектировании.

Принципиальной чертой концепции «цифрового двойника» является то, что он должен сопровождать свой прототип на всех стадиях его жизненного цикла. Для конкретных технических объектов, а также для больших транспортных систем, можно выделить четыре укрупнённых этапа в жизненном цикле: 1) планирование или замысел, сопровождающиеся сбором требований, 2) проектирование, 3) ввод в действие, эксплуатация и поддержка и 4) завершение и утилизация. Если говорить о транспортных системах, которые являются объектом интереса в данной работе, то в настоящее время, имитационное моделирование активно применяется на двух «средних» стадиях жизненного цикла – то есть на этапах их проектирования и фактической эксплуатации. При этом опыт авторов настоящей работы показывает, что существует определённая специфика заказной разработки и внедрения имитационных моделей в зависимости от того, на какой стадии жизненного цикла прототипа они используются. Однако общим моментом является то, что практически всегда помимо собственно имитационной модели (то есть компьютерной программы) заказчику оказываются нужны также некие дополнительные компетенции или расширения модели, тесно связанные с конкретной предметной областью. Далее в докладе этот тезис раскрывается на примерах нескольких реальных кейсов для случаев применения имитационного моделирования как на этапе проектирования будущих транспортно-технологических систем, так и на этапе эксплуатации уже существующих.

## 2. Расширения имитационной модели на стадии проектирования системы–прототипа.

### 2.1. Проектные решения

Широко известным определением имитационной модели является рассмотрение ее как инструмента, позволяющего ответить на вопрос «что будет если?». Безусловно, ответ на этот вопрос очень важен уже на стадии концептуального проектирования будущей системы, поскольку возможность просчитать её реакцию на произвольные внешние условия позволяет найти наиболее эффективную конфигурацию. При этом в классической схеме взаимодействия заказчика и исполнителя за предоставление информации о том, какие «если» следует рассматривать, полностью отвечает заказчик, тогда как инструмент, отвечающий «что будет?», изготавливает исполнитель. К сожалению, эта идеальная бизнес-схема почти всегда оказывается неосуществимой в реальной жизни. Дело в том, что на стадии проектирования контуры будущей системы никогда не бывают определены полностью, а конкретные проектные решения как раз и должны быть выбраны из множества допустимых вариантов по результатам прогонов имитационной модели. Поэтому заказчик, как правило, не в состоянии предоставить полную выборку этих допустимых вариантов и ждёт от исполнителя не только результаты моделирования, но и конкретные рекомендации по выбору или изменению базовых проектных решений. Для того чтобы исследователь мог сформировать подобные решения в качестве входных данных имитационных экспериментов, он должен быть квалифицированным специалистом в рассматриваемой предметной области. Таким образом, тесная смычка инженеров-проектировщиков предметной области и математиков, специализирующихся на имитационных моделях, становится императивом для создания подобных моделей, обладающих реальной практической значимостью.

Приведём несколько примеров реальных работ, выполненных специалистами компании ООО «Бюро Гиперборея», в которых искомые проектные решения были найдены в рамках комплексного исследования, включающего как построение имитационной модели изучаемой транспортной системы, так и сопутствующие работы по определению проектного облика отдельных элементов.

1. Модель транспортного обеспечения Баимского горнорудного месторождения. Согласно техническим требованиям к проекту основным транспортным средством соответствующей логистической системы должно стать перспективное ледокольное универсальное сухогрузное судно (УСС) дедвейтом около 40 тысяч тонн, не имеющее прямых аналогов среди существующих судов. В ходе прямых рейсов УСС должно

обеспечивать перевозку рудного концентрата в бигбэгах, а в обратных рейсах – грузов снабжения в стандартных контейнерах. С точки зрения принципиальной модели логистической системы, в качестве единственных определяющих параметров УСС как транспортного ресурса должны быть заданы его ходовые качества (скорости движения на чистой воде и в ледовых условиях), а также суммарная грузовместимость по двум основным грузам – рудному концентрату и контейнерам. Однако определение непротиворечивых величин грузовместимости в данном случае оказывается невозможным без достаточно детального рассмотрения концептуального технического облика судна. Дело в том, что удельная масса руды, перевозимой в бигбэгах, более чем в четыре раза превышает номинальную удельную массу генеральных грузов, перевозимых в контейнерах. Далее, бигбэги перевозятся только в трюмах, а контейнеры также и на палубе УСС. И, кроме того, для каждой конкретной схемы расположения груза необходимо обеспечить удовлетворение требований остойчивости и удифферентовки судна на ровный киль путём заполнения имеющихся балластных цистерн. Перечисленные выше требования зачастую противоречат друг другу, а их одновременное удовлетворение требует использования достаточно сложной расчётной модели и высокой квалификации разработчика в области концептуального проектирования судов. В частности, для описываемого проекта УСС оказывается, что обеспечить приемлемое значение метацентрической высоты, то есть избежать повышенной остойчивости при полной загрузке судна бигбэгами, удаётся только при размещении значительной части бигбэгов на съемном твиндеке, расположенном существенно выше днища трюма (рис. 1). Это, в свою очередь, приводит к необходимости установки продольной перегородки в трюме (для уменьшения пролета твиндека), что, однако, уменьшает максимально возможное число перевозимых контейнеров. Для выполнения всех необходимых расчётов было использовано специализированное программное приложение «Проектная модель судна ледового плавания», разработанная специалистами ООО «Бюро Гиперборея». В этом приложении была реализована концепция «прямого проектирования», принципиальное описание которой применительно к накатным судам для чистой воды можно найти в работе [2], а применительно к арктическим судам снабжения – в статье [3]. Концепция заключается в том, что на вход проектной модели в явном виде поступают основные главные размерения судна, а в самой модели выполняется лишь анализ того, возможна ли реализация данного судна (т.е. выполняются ли все проектные ограничения) при данных размерениях. При этом в приложении последовательно выполняются следующие проектные

расчеты: 1) генерация теоретического чертежа (формы обводов корпуса) под заданные главные размерения; 2) расчёт основных общепроектных параметров судна; 3) формирование схемы общего расположения и расстановка переборок; 4) размещение основных типов груза в трюмах и на крышках люков; 5) моделирование геометрии балластных цистерн; 6) расчёт нагрузки масс и центра тяжести судна порожнём; 7) расчёт дедвейта судна; 8) проверка требований остойчивости и посадки для рассматриваемых состояний загрузки, автоматическая или ручная балластировка; 9) расчёт параметров ходкости в чистой воде и во льдах. Пример получаемых схем размещения груза и посадки УСС приведен на рис. 1.

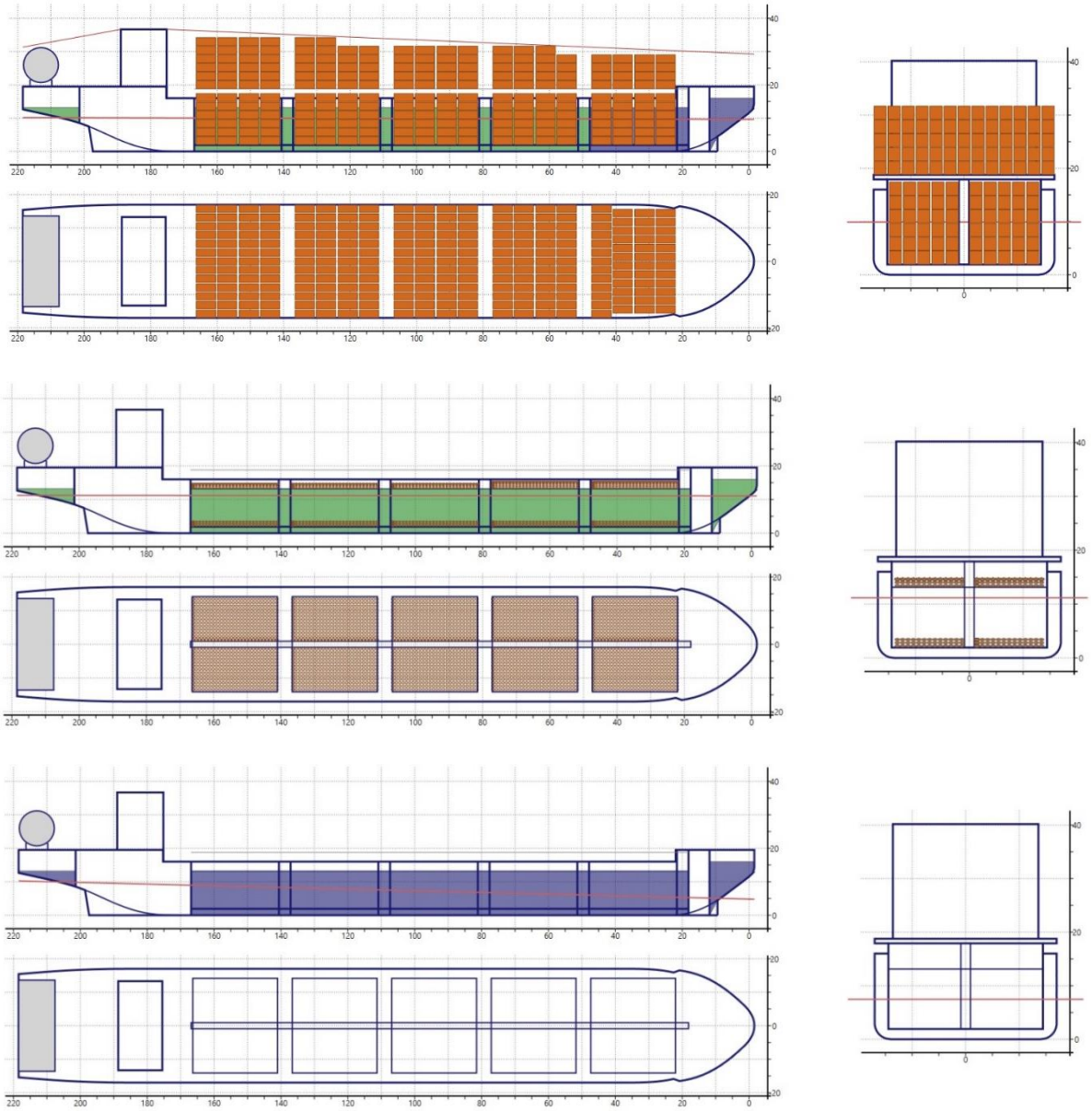

Рисунок 1. Схемы размещения груза и посадки УСС для трёх состояний загрузки: полный груз контейнеров (сверху), биг-бэгов (посередине) и судно в балласте (снизу)

Таким образом, залогом успешного выполнения описанного комплексного проекта явился тот факт, что компетенции и в предметной области проектирования судов, и в общесистемной теории построения имитационных моделей оказались объединены рамках единой работы.

2. Модель транспортной системы транзитного контейнерного судоходства по трассам Северного Морского Пути по заказу компании Русатомкарго [4]. В рамках этой работы также были выполнены исследования в двух направлениях. Во-первых, был построен вариантный ряд перспективных концептуальных проектов арктического контейнеровоза вместимостью 6000 TEUs, имеющих ледовый класс Arc7 и Arc8 и различные типы энергетической установки (на сжиженном газе, на дизельном топливе, атомные). Для этого специалистами нашей компании также было использовано приложение «Проектная модель судна ледового плавания». Во-вторых, была построена имитационная модель и проведён ряд вычислительных экспериментов по многолетней имитации рейсов этих судов на трассах СМП с различными сценариями развития ледовой обстановки и стратегиями работы флота ледокольного обеспечения. Этот кейс также демонстрирует то, что потенциальное желание компании–заказчика получить по результатам одной работы сразу и рекомендуемые концептуальные проектные решения и их сравнительный анализ в ходе имитационных экспериментов можно считать мейнстримом настоящего времени.
3. Модель генеральной реконструкции Мурманского балкерного терминала. В рамках данного заказа работы по построению и исследованию имитационной модели были тесно увязаны с идущими параллельно и постоянно меняющимися проектными решениями по модификации портовой инфраструктуры (достаточно сложная, разветвлённая и многовариантная сеть конвейерных линий и бункеров/хранилищ). В этом случае наличие необходимых компетенций в области строительного и производственного проектирования было обеспечено в рамках кооперации с компанией «Морские строительные технологии», но с точки зрения конечного заказчика по-прежнему принципиальным преимуществом являлась возможность делегировать формально единственному подрядчику одновременно и проектные и аналитические исследования в рамках единого договора.

### 2.2. Оптимизация базовых параметров

Результатом прогона имитационной модели в течение конечного периода модельного времени являются конкретные интегральные характеристики системы. Следовательно, можно ставить и решать обратную задачу, т.е.

оптимизировать эти характеристики путем варьирования внутренних определяющих параметров системы. Типичные методики комбинирования методов алгебраической оптимизации и имитационного моделирования рассмотрены во многих теоретических работах [5, 6], где приведены различные схемы взаимодействия этих процедур. Наиболее часто встречающимся прецедентом является случай, когда оптимизация представляет собой внешний контур над динамическим имитационным движком, то есть оптимальные значения параметров исследуемой системы ищутся в ходе последовательных итераций (прогонов модели) в рамках оптимизационного вычислительного эксперимента.

Традиционно на уровне стратегического или проектного планирования морских транспортных систем выделяются две задачи, которые можно успешно решать с помощью интеграции подходов математического моделирования и алгебраической оптимизации. Первая из них – так называемый анализ контрактов (Contract analysis problem), то есть определение того, какие обязательства по перевозке каких объемов груза в какие сроки может взять на себя оператор или судовладелец. Еще одна типичная задача проектного уровня – определение состава и структуры флота (Fleet size and mix problem), а более широко – определение необходимых качественных и количественных характеристик всей транспортной инфраструктуры, потребных для гарантированного обеспечения заданного объема грузопотока.

## 3. Расширения имитационной модели на стадии эксплуатации системы–прототипа.

Основным расширением стандартной функциональности имитационной модели, необходимость в котором возникает при описании эксплуатации существующих транспортных систем, является учёт механизмов оперативного планирования. Дело в том, что практически всегда при создании и последующей параметрической оптимизации имитационной дискретно-событийной или агентно-ориентированной модели сложной транспортно-технологической системы возникает необходимость адекватного учета «интеллектуальных» аспектов ее функционирования на уровне оперативного управления. Действительно, реальная эксплуатация любого многофункционального объекта (порта, контейнерного терминала, нефтедобывающей платформы) предполагает наличие службы локальной диспетчеризации для разрешения возникающих инцидентов различного характера и противоречивых интересов субъектов разного уровня организации. Самым простым аспектом такой диспетчеризации выступает определение очередности обслуживания всех текущих или прогнозируемых на коротком временном интервале заявок на обслуживание.

Безусловно, алгоритмы и компьютеризированные системы автоматизации календарного планирования работ и/или распределения ограниченных ресурсов относятся к другому временному уровню управления, нежели предпроектный анализ изучаемой системы. Однако пренебрежение этими аспектами в имитационной модели, то есть отсутствие в ней некого «интеллектуального» модуля, отвечающего за оперативное планирование и перепланирование текущей загрузки в зависимости от складывающейся ситуации, может повлечь существенную недооценку интегральных показателей её эффективности и пропускной способности [7]. Часто для разрешения этого противоречия используется упрощенный подход, связанный с заданием в логике модели неких жестких правил исполнения последовательности заявок на обслуживание («первым пришел – первым ушел» и т.п.). Однако реальная практика построения и анализа моделей для различных транспортно-технологических систем, показывает, что любые подобные упрощения часто оказываются внутренне противоречивыми и не позволяют получить не только адекватные численные оценки эффективности конкретной конфигурации системы, но даже сделать обоснованный вывод о том, какая из сравниваемых конфигураций предпочтительнее. Действительно, авторам неоднократно приходилось сталкиваться с упомянутой проблемой и искать адекватные и экономичные способы ее разрешения. Ниже кратко перечислены некоторые подобные прецеденты.

1. Имитационные модели работы и снабжения нефтедобывающих платформ и нефтеперегрузочных комплексов [8]. В качестве основного аспекта оперативного планирования здесь выступает постоянное нахождение баланса между обслуживанием транспортных судов основного производственного контура и конкурирующих с ними за причальные места судов снабжения. Определяющими факторами при принятии оперативных решений выступают текущие уровни наполнения хранилищ различных грузов и специфичные для судов разных типов «окна погоды».
2. Модели арктических морских транспортных коридоров. Существенным аспектом уровня оперативного планирования, требующим адекватного учета в имитационной модели, здесь выступает проблема оптимальной маршрутизации судов ледового плавания для сильно нестационарной во времени и пространстве динамики ледовой обстановки [9]. Не менее важной задачей, возникающей в практике арктического судоходства и требующей отражения в имитационных моделях арктических транспортных систем, является оперативное планирование и оптимизация работы ледокольного флота в условиях ограниченности ледокольного ресурса [10].

3. Модели контейнерных терминалов. Наиболее значимый аспект оперативного планирования и управления в данном случае связан с оптимальным размещением и штабелированием контейнеров на временных площадках хранения для обеспечения минимального количества операций по их перемещению и перегрузке [11].
4. Имитационные модели работы порта. В данном случае блок эмуляции оперативного планирования портовых операций с учетом ограниченности стационарных и движущихся ресурсов (причалы, буксиры, хранилища, бункеровщики, средства грузообработки и т.д.) выступает чуть ли не главным элементом имитационной модели. Одним из предлагаемых способов его реализации служит сведение задачи предметной области к формальной математической постановке задачи удовлетворения целочисленных ограничений и ее решение с использованием специализированных внешних решателей и движков [12].

## 4. Заключение

Адекватное воспроизведение в имитационной модели механизмов оптимального оперативного управления важно не только для анализа уже существующей транспортной системы (то есть на стадии эксплуатации), но и на стадии проектирования. Единственным решением, гарантирующим получение адекватных результатов, становится реализация элементов интеллектуального оперативного управления непосредственно внутри логики имитационной модели. Как правило, математическим аппаратом такой «внутренней» оптимизации выступают алгоритмы и методы комбинаторной оптимизации и математического программирования. А идеализированная структурная схема взаимодействия процедур имитационного моделирования и оптимизации на уровне проектного анализа транспортных систем приобретает трехуровневый характер («Алгебраическая оптимизация» → «Имитационная модель» → «Комбинаторное оперативное планирование»). Иными словами, расширения базового функционала имитационной модели, связанные с внедрением в её логику алгоритмов комбинаторной оптимизации, имеют смысл на любой стадии жизненного цикла системы–прототипа (рис. 2). Основным препятствующим этому техническим ограничением выступают соображения вычислительной эффективности. Тем не менее, большинство высокоуровневых сред и платформ имитационного моделирования уже сейчас включают в свой состав мощные оптимизационные движки, в функциональность которых помимо стандартных процедур алгебраической оптимизации малой размерности заложены и методы многопараметрического математического программирования. В качестве примера можно указать профессиональный решатель IBM ILOG CPLEX, интегрированный с платформой AnyLogistix [13],

или расширенный программный интерфейс оптимизатора OptQuest, к которому можно обратиться напрямую из кодов модели AnyLogic. Представляется, что дальнейшее расширение средств интеграции специализированных движков комбинаторной оптимизации и имитационных моделей должно помочь в разрешении указанного противоречия.

С другой стороны, в настоящее время кажется нереалистичной возможность предложить некое универсальное решение для бесшовной интеграции средств автоматического проектирования даже на уровне концептуальных моделей (т.н. 1D-CAD/CAE систем) с функционалом имитационного моделирования. И, пожалуй, единственным перспективным подходом здесь может быть создание под каждый проект мобильной мультидисциплинарной команды исследователей, потенциально способной обеспечить все необходимые компетенции равно как в предметной области проектирования, так и в области математического моделирования.

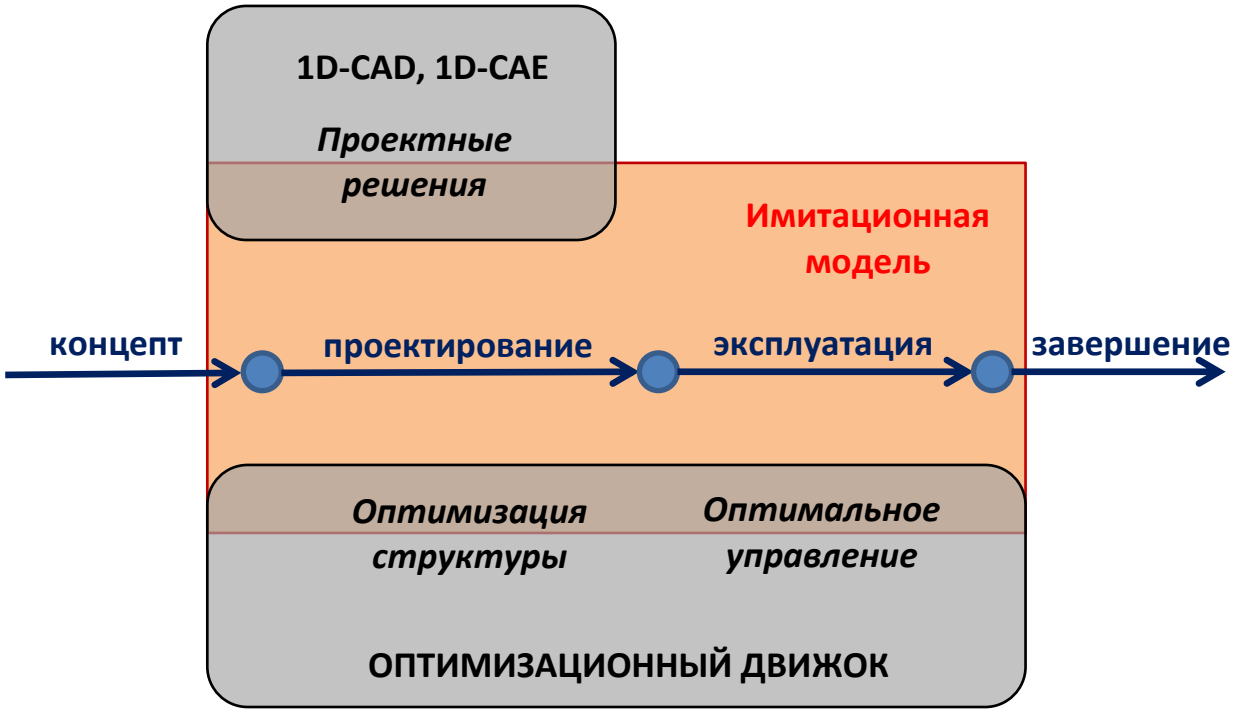


Рисунок 2. Полезные расширения функционала имитационной модели на разных стадиях жизненного цикла системы-прототипа.

**Список литературы**

1. Parrott A., Warshaw L. Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing meets its match, Deloitte University Press, May 12, 2017.
2. Papanikolaou A. Ship Design. Methodologies of Preliminary Design, Springer Verlag, 2014.

3. Kondratenko A.A., Tarovik O.V. Analysis of the impact of arctic-related factors on offshore support vessels design and fleet composition performance // Ocean Engineering. (203), 1 May 2020, 107201.
4. https://bureauhyperborea.ru/im-smtk/
5. Fu M.C. Optimization for simulation: theory vs. practice // INFORMS Journal in Computing 14(3), 2002. P. 192–215.
6. Bachelet B., Yon L. Model enhancement: improving theoretical optimization with simulation // Simulation Modelling Practice and Theory. (15). 2007. P. 703–715.
7. Топаж А.Г., Таровик О.В., Реуцкий А.С. Использование алгоритмов оперативного планирования в имитационных моделях морских транспортно-технологических систем // Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2019), Санкт-Петербург, 10 июля 2019 г.
8. Таровик О. В., Топаж А. Г., Крестьянцев А. Б. Кондратенко А.А., Зайкин Д.А. Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы "Приразломная" // Арктика: экология и экономика. № 3 (27). 2017. С. 86-102.
9. Топаж А.Г., Таровик О.В., Бахарев А.А. Автоматическая маршрутизация судов во льдах: постановка задачи и инструменты решения // Арктика: экология и экономика. – 2022. – Том 12, №1 – С. 121-139
10. Топаж А.Г., Егоров С.В., Буянов А.С., Карпенко А.А., Малыханов А.А. Планирование работы ледокольного флота в имитационных моделях морских арктических транспортных систем // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание), 20–22 октября 2021 г., Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021. – 694 с. – ISBN 978-5-905526-05-3. С. 396-411.
11. Нужнов Е. В., Юрко Д. С. Возможности и средства динамического планирования и перегрузки контейнеров на смешанных транзитных терминалах // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'14. М., 2014. Т. 2. С. 49 – 56
12. Киселёв В.А., Чивилихин Д.С., Топаж А.Г. Исследование сведения задачи календарного планирования портовых операций к задаче удовлетворения ограничений // Сборник трудов Всероссийской конференции по математике, Материалы молодёжной прикладной IT-школы «Математические методы и модели в экологии», Барнаул, 27 июня-1 июля 2019 г., – С. 138-141

13. Жеребцов А.А., Борщёв А.В. Имитация и линейное программирование: совместная работа двух методов на примере оптимизации цепей поставок // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание), 20–22 октября 2021 г., Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021. – 694 с. – ISBN 978-5-905526-05-3. С. 23-29.