

УДК 004.942:658.51:629.5

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАРУБЕЖНОМ СУДОСТРОЕНИИ: ОБЗОР МИРОВОЙ ПРАКТИКИ

М.А. Долматов, А.О. Макурин (Санкт-Петербург)

Современное судостроение представляет собой одну из наиболее сложных отраслей машиностроения, характеризующуюся высокой степенью интеграции производственных процессов, множественностью участников и строгими требованиями к срокам и качеству выпускаемой продукции. В условиях глобальной конкуренции, индивидуализации заказов и растущей сложности проектируемых объектов ключевым фактором успешного функционирования судостроительных верфей становится эффективность планирования и управления производственными ресурсами. Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования производственной деятельности в мире выступает применение методов имитационного моделирования и основанных на них программных решений, которые в настоящее время достаточно активно используются за рубежом в различных отраслях промышленности.

Доля России в мировом гражданском судостроении крайне мала (0,015 %) по сравнению с такими лидерами отрасли/рынка как Китай (71%), Южная Корея (17%) и Япония (8%) [1]. Тем не менее, без учета мировых тенденций развития судостроительной отрасли невозможно обеспечение конкурентоспособности предприятий российского судостроения.

Настоящий обзор охватывает зарубежные публикации, посвящённые использованию имитационного моделирования в судостроении за прошедшее десятилетие. В обзор не включена значительная часть из рассмотренных авторами публикаций, т.к. описанные в них примеры применения имитационного моделирования по описанным подходам, применяемым инструментам и результатам аналогичны материалам, включенным в данный обзор. Особое внимание уделяется классификации методов, их практической апробации, а также оценке результатов внедрения, что позволяет выявить основные тенденции и определить перспективные направления дальнейших исследований. Поскольку в большинстве рассмотренных материалов исследуются сразу несколько аспектов анализа судостроительных производств (планирование, логистика, оптимизации ресурсов и т.п.), авторы разместили материалы не по тематическим направлениям, а по годам публикации статей.

В качестве источников информации использованы размещенные в открытом доступе преимущественно англоязычные публикации в зарубежных журналах и труды международных конференций, в т.ч. Winter Simulation Conference – крупнейшей мировой конференции, посвященной вопросам имитационного моделирования.

Nadjina et al. [2, 2015] исследовали производственный процесс производства одного из цехов верфи. В качестве объекта исследования была выбрана роботизированная линия резки профильного проката корпусообрабатывающего цеха. Для анализа и оптимизации процессов использовалась система дискретно-событийного моделирования eM-Plant и язык SimTalk. Авторами разработана методика, предполагающая выполнение семи этапов имитационного исследования, включая постановку задачи, создание имитационной модели, её верификацию, анализ сценариев и внедрение. Имитационная модель, внедренная на производстве, показала расхождение с производственными статистическими данными всего на 3-5%. Применение разработанной методики позволило оптимизировать работу роботизированной линии и сократить время обработки заготовок профилей на 13%.

Исследование Wang et al. [3, 2015] связано с моделированием логистики

перемещения на верфи сборочных единиц строящихся судов. Предварительно был выполнен анализ загруженности ресурсов (складов, транспортеров, дорог) на одной из судостроительных верфей Китая. Для решения задачи оптимизации среднесрочного и календарного планирования использовалось дискретно-событийного моделирования, имитационная модель была разработана в системе QUEST. Модель позволила определить дисбаланс в загрузке транспортного оборудования и выявить узкие места (складские площадки) верфи, чем доказала свою эффективность для прогнозирования и оптимизации логистических процессов.

Jeong et al. [4, 2016] предложена система логистической поддержки процессов транспортировки блоков судна на судостроительном заводе.

Проект выполнялся специалистами из Seoul National University, Xinnos Co., Korea Maritime and Ocean University и DSME (Южная Корея). Цель проекта – создание решения, позволяющего планировщикам быстро и регулярно переигрывать схемы перемещения блоков (поддерживает анализ типа «что-если») под часто изменяющиеся производственные планы и стратегии, а также отслеживать текущее состояние потоков и издержки предприятия.

Архитектура решения построена на принципе объединения информационной модели, симулятора и системы оценки результатов (KPI). Решение включает: интерфейс для преобразования данных производственного плана и геоданные верфи во внутренний формат модели, симуляционное ядро, модуль раскладки блоков (с оптимизатором) и модуль поиска маршрутов (с оптимизатором).

В качестве исходной информации система использует расписание выпуска/перемещений сборочных единиц и планировку верфи, а на выходе выдает количественные показатели логистики (время, расстояния и т.п.) и оценку стоимости перемещений для последующего сравнения альтернативных вариантов.

Cebral-Fernández et al. [5, 2016] разработали имитационную модель судостроительного завода для анализа и оптимизации производственных процессов, оценки влияния различных факторов (количество участков, календарные графики, ресурсы) на продолжительность строительства. Объектом моделирования являлась одна из верфей, принадлежащих компании Navantia-UDC (Испания). Созданная дискретно-событийная модель предназначена для улучшения календарного планирования и более эффективного использования производственных мощностей. Посредством модели выполнялась оценка сроков строительства и локальные сроки прохождения блоков по цехам, проверка влияния числа участков оборудования и персонала, наличия транспортных средств и сменности. Модель охватывала полный цикл постройки корпуса судна, включая раскрой металла, сборку, сварку и насыщение, дробеструйную очистку и окраску, донасыщение, сборку корпуса судна из блоков на стапеле, а также спуск готового изделия. Модель выполнена в системе ExtendSim, интегрированной с базой исходных данных Microsoft Excel. Длительности технологических операций принимались по вероятностным их распределениям в зависимости от характеристик блоков. Созданная модель позволила определить, что:

- существуют временные разрывы между сборкой секций и сборкой блоков, особенно в начале потока и в его «хвосте», что указывает на необходимость выравнивания загрузки мощностей;
- около трети суммарного календарного срока приходится на «последние» блоки, следовательно, оптимизация последовательности и приоритетов способна заметно сократить длительность работ;
- окрасочный участок не является критическим;
- оценка по средней загрузке мощностей малоинформативна, необходимо анализировать динамику выпуска по стадиям и интервалы между завершениями

операций, чтобы локализовать возможные точки задержек.

В результате моделирования показано, что для ощутимого сокращения сроков необходимо применять «продвинутые» методы календарного планирования и алгоритмы диспетчеризации, а не только имитационное моделирование.

В работе Cebral-Fernández et al. [6, 2017] описана многоуровневая имитационная модель, которая может использоваться как на ранних этапах проектирования (укрупненное планирование), так и на финальных этапах (детальное планирование). Объект моделирования – верфь Navantia Ferrol (Испания). Модель включает цеха резки металла и сварки, предварительной сборки, оснастки, окраски и стальные позиции, задействованные в процессе постройки кораблей типа фрегат. Разработка модели выполнена в системе ExtendSim, интегрированной с базой данных Microsoft Excel и SAP.

Имитационная модель позволила:

- оптимизировать последовательность изготовления блоков, что позволило сократить время постройки;
- выявить «узкие» места в цехе резки и сварки, предложить меры для их устранения;
- определить максимальную производительность линии по изготовлению панелей, найти оптимальные комбинации ресурсов;
- сбалансировать загрузку ресурсов и сократить время ожидания на складских площадках.

В работе Kusturica et al. [7, 2018] описана разработка методологии прогнозирования времени выполнения логистических операций на основе исторических данных и экспертной информации. Проект выполнялся специалистами University of Applied Sciences Zwickau и University of Kassel (Германия).

Авторами предложено решение на основе имитационных методов и эталонной модели цепи поставок для оценки длительностей процессов строительства уникальных и малосерийных проектов и обеспечения выполнения производственного плана предприятия в условиях высокой неопределённости. Используемая в решении модель выполняет несколько ролей: валидирует правила прогнозирования, служит оценщиком длительностей отдельных задач, поддерживает чувствительный анализ качества данных и правил, а также проверку/оптимизацию всего календарного плана с учётом неопределённостей и затрат. Предлагаемое авторами решение также включает модули для адаптации под конкретное предприятие и интеграции с инструментами управления проектами.

В качестве исходных данных и параметров система используются сведения из ERP предприятия и данные по выполнению прошлых проектов. Ограничивающим фактором применения данной системы является доступность и качество данных у малых и средних предприятий.

Dwyer и Morris [8, 2018] предложили систему, которая помогает на ранних стадиях жизненного цикла оценивать ходовые и эксплуатационные качества кораблей и тем самым выступать «умным покупателем» при выборе и доработке типовых серийных проектов. Работы выполнялись специалистами Морского подразделения группы Defence Science and Technology (Австралия).

В состав решения входят средства интеграции различных программ и моделей, а также инструменты планирования экспериментов, построения поверхностей отклика и анализа чувствительности. Авторами была выполнена стыковка библиотеки специализированных расчётных моделей с единой средой проведения вычислительных экспериментов. Система опирается на сценарии поведения и районы действий, перечень операций и их значимость, статистику волнения и курсов относительно волны, профили

скоростей, допустимые диапазоны проектных переменных, справочные базы по энергетическим установкам и правила по остойчивости. На выходе система формирует наглядные карты «дизайн-пространства», наборы решений, не уступающих друг другу по ключевым критериям, индексы работоспособности в море, оценки сопротивления на переходах и требуемой мощности, а также риски несоответствия требований готовым проектам.

Применение системы позволяет уточнить требования к выпускаемым серийным проектам и обосновать необходимые изменения конструкции, что снижает финансовые и проектные риски.

Peng et al. [9, 2018] описывают дискретно-событийную модель сварочного цеха, предназначенного для изготовления крупных секций корпуса судна. Разработка выполнена группой специалистов НИИ № 716 китайской судостроительной промышленности и Колледжа машиностроения и электротехники Харбинского Инженерного Университета (Китай). Модель создана в системе Plant Simulation. На основе модели выполнен анализ функционирования производственных линий для изготовления плоских и криволинейных секций с учетом интенсивности отказов оборудования и его ремонта и других производственных факторов. Имитационная модель цеха позволяет до выдачи в цех сменных заданий проверять реализуемость производственных планов, сравнивать варианты расписаний работы оборудования и персонала, выявлять «узкие» места и оценивать последствия изменений. Авторами предложены показатели оценки функционирования производственной линии.

Jeong et al. [10, 2019] описывают интегрированную процесс-ориентированную модель блока сборочных производств верфи. Модель создана исследователями кафедры промышленной инженерии и менеджмента Корейского университета (Сеул, Корея). Модель включает основные производственные участки, технологическое оборудование и персонал. Модель реализована с использованием сети Петри с временной задержкой. Адекватность модели проверена на реальных статистических данных.

В рамках модели спецификации в составе конструкторско-технологических документов на крупные сборочные единицы (блоки) автоматически трансформируются в потоки операций, далее из них строится процессная модель, после чего в неё добавляются календарь, данные о доступности производственных площадок и производственные ресурсы (оборудование, рабочие места, персонал). Поверх этой модели запускается алгоритм выравнивания по общим ресурсам, который «пересобирает» производственный график, минимизируя совокупные издержки при соблюдении технологических зависимостей.

При выполнении исследования для эталонного крупного блока сравнивались исходный и «сбалансированный» графики. Модель назначает ускорение выбранным операциям – т.е. намеренное сокращение их длительности за плату по суточной ставке – с разными ставками для различных групп работ. Эти дополнительные инвестиции отражают стоимость сокращения длительности операций, которые позволяют уменьшить общий срок строительства. За счёт таких дополнительных затрат общая длительность работ сократилась на 10 дней. Также были устранены косвенные расходы за лишнюю занятость сборочного места. Предложенный метод может масштабироваться на другие цеха. При этом процессная интеграция с балансировкой общих ресурсов позволяет формировать более реалистичные планы, заранее видеть, как дешевле сократить длительности и где важнее разгрузить «узкие» места.

Работа Goo et al. [11, 2019] связана с разработкой метода моделирования многоуровневой дискретно-событийной системы для решения задачи календарного планирования постройки судов. Авторы предложили использовать новый формализм как расширение классического дискретно-событийного моделирования, которое позволяет в

одной модели совместить несколько уровней расписаний: генеральный, операционный и детальный. Основная идея – формально описать межслоевую синхронизацию так, чтобы часть портфеля заказов могла считаться по грубым агрегатам, а часть – по детальным процессам и ресурсам. Связь слоёв обеспечивается через общие «референс – переменные» (масса, водоизмещение, серийность, степень готовности) и функцию длительности, зависящую от фактической загрузки мощностей, что особенно важно для трудоёмких сборочных операций.

Объектом моделирования выбрана верфь, где производство основано на принципе «проектирование под заказ». Имитационная модель описывает детальное функционирование сборочно-сварочного производства и пяти сборочных цехов. В процессе экспериментов сравнивались три режима: мастер-уровень, операционный и «смешанный». Последний даёт лучший баланс точности и затрат на моделирование: по мере появления детальных данных прогнозы сроков и загрузки естественно уточняются, а ранние оценки становятся менее консервативными.

Предлагаемый подход позволяет выполнять регулярный пересчет портфеля заказов при неполных данных, сокращая защитные буферы, добавленные в модель для предотвращения возникновения критических ситуаций, определять критический путь и оптимизировать загрузку производственных участков. Модель интегрирована в контур MES/ERP верфи.

Genç и Özkök [12, 2020] рассматривают заключительный этап сдачи судна (ходовые испытания) и показывают, как применение моделирования позволяет сократить его длительность, уменьшить стоимость рейса и ускорить передачу судна заказчику. Работа выполнялась специалистами из Ordu University и Karadeniz Technical University (Турция).

В качестве исходных данных использовался полный перечень испытаний для химовоза грузоподъемностью 8400 тонн, зафиксированы типичные продолжительности каждого теста вместе с подготовкой (оптимистичное, ожидаемое и пессимистичное значения), описан стандартный маршрут испытательного рейса при нормальных погодных условиях и отсутствии отказов. В среде SIMIO была создана базовая модель последовательности работ с треугольными распределениями длительностей. В процессе исследования перестраивался порядок выполнения испытаний, выделялись независимые проверки в параллельные ветви (например, часть испытаний котельной и судового устройства якорно-швартовного с разных бортов с повторным просчетом модели. Это позволило сократить время испытаний примерно на 10%.

Ju et al. [13, 2020] выполнили разработку системы для формирования среднесрочных производственных планов верфи. Объектом моделирования была выбрана верфь в Южной Корее, с численностью персонала 3500 сотрудников. Производственная программа верфи – 4 заказа. Технологический процесс включает порядка 5700 операций. Система интегрирована с существующей системой планирования предприятия. Созданная система позволяет:

- уменьшить количество задержек (с 4200 до 33);
- сократить общее время выполнения работ (с 357 до 341 дня);
- оптимизировать распределение ресурсов (персонал, площади, оборудование).

Sender et al. [14, 2020] предложили метод комплексного логистического планирования. Метод базируется на интегрированном подходе к производственному планированию производства и логистики с учетом специфики транспортных процессов и применении специализированного приложения YardPlan 2.0 для имитационного моделирования логистики. Модуль логистики в его составе включает алгоритмы для сочетания транспортных ресурсов, учета времени удержания грузов и оптимизации

маршрутов. Анализируются маршруты возможных транспортных ресурсов от источника к стоку с проверкой пропускной способности каждого транспортного ресурса на маршруте, а также возможности объединения ресурсов. Применение инструмента продемонстрировано на примере планирования верфи, где выявлены «узкие» места и предложены рекомендации по их устранению.

Jeong et al. [15, 2020] предложили процессно-ориентированный метод моделирования для описания технологических процессов при планировании работ по сборке крупных сборочных единиц корпуса судна. Цель работы – обеспечить гибкое планирование производства, учесть взаимосвязи между строящимися изделиями, процессами, ресурсами, графиками и площадями и повышение эффективности анализа производительности. Работа выполнялась в сотрудничестве с Korea Shipbuilding and Offshore Engineering (Южная Корея). В результате был предложен процессно-ориентированный метод моделирования, состоящий из четырёх этапов:

- создание блочной модели (продукт, процесс, ресурсы);
- разработка интегрированного сетевого процесса;
- построение модели на основе процессов;
- создание имитационной модели с использованием сетей Петри.

Предложенный метод позволяет анализировать производительность по четырём ключевым параметрам: продолжительность производственного цикла, пропускная способность, использование ресурсов и стоимость ресурсов; и заранее выявлять проблемы, оптимизировать использование ресурсов и сокращать время производства.

Lee et al. [16, 2020] разработали систему, сочетающую общее и календарное планирование с дискретно-событийным моделированием. Работа выполнена в сотрудничестве с Korea Shipbuilding and Offshore Engineering (Южная Корея).

Внедрение системы на верфи позволило:

- сократить среднее время изготовления сборочных единиц в цехе на 16,4% (с 51 дня до 42 дней);
- повысить точность планирования на 10%;
- за счет «обратного» планирования оптимизировать загрузку ресурсов и сроки выполнения работ.

Mao et al. [17, 2020] исследовали совместное параллельное планирование постройки заказов на верфи в открытой распределенной производственной среде. бъект моделирования – предприятие Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd. (Шанхайская верфь Вайгаоцяо, Китай).

По результатам исследования:

- предложена многоагентная система для симметричного общего и календарного планирования, включающая модули планирования и распределения задач;
- разработан *Генетический многоагентный алгоритм сортировки* для решения локальных задач календарного планирования;
- проведены эксперименты, подтвердившие эффективность метода в устранении конфликтов ресурсов и достижении согласованных решений;
- создан прототип системы Системы совместного общего и календарного планирования сложных судостроительных проектов для дальнейшего практического применения.

Liu M [18, 2021] разработали метод комплексного и имитационного моделирования производственных процессов погрузки козловыми кранами сборочных единиц на заказ в сухом доке верфи. Объект моделирования – верфь CIMC Raffles Offshore Engineering Pte., Ltd. (Китай).

В рамках реализации проекта:

- предложена комплексная модель, которая описывает производственные и информационные потоки, а также учитывает административные ресурсы, оказывающие влияние на производственный процесс;

- разработан алгоритм имитационного моделирования на основе процессно-интерактивного метода, обеспечивающий эффективное выполнение модели;

- проведено исследование на реальных данных, которое показало возможность оценки производительности системы по таким показателям, как общее время выполнения, загрузка ресурсов, уровень незавершенного производства и прогресс работ.

По результатам работ подтверждено, что разработанный метод:

- эффективно решает задачу моделирования проектно-ориентированных процессов, учитывая их уникальные особенности, такие как взаимодействие персонала и динамическое распределение ресурсов;

- позволяет выявлять узкие места в производственном плане, оптимизировать загрузку ресурсов и улучшать управление сроками выполнения работ.

Okubo и Mitsuyuki [19, 2022] решалась задача планирования строительства судов с использованием системного моделирования и методов дискретно-событийного моделирования. Цель работы – автоматизация создания реалистичных производственных планов для судостроительных верфей с учетом сложности строящихся заказов. Авторами предложен метод системного моделирования на основе четырех моделей (Продукт, Рабочий процесс, Рабочее место и Команда), позволяющих выполнять оценку «узких» мест и оптимизацию распределения ресурсов. Для проведения исследований авторы использовали «виртуальную» модель производства.

В результате исследования:

- разработан метод, позволяющий автоматически генерировать производственные планы в виде диаграмм Ганта;

- создан детальный план изготовления одного блока корпуса судна.

- проанализированы узкие места при изготовлении пяти блоков корпуса, выявлены критические рабочие места (например, участок сварки);

- предложен и проверен план перераспределения рабочих, показавший возможность сокращения персонала без ущерба для производительности.

Taniguchi et al. [20, 2022] разработан высокоточный симулятор (модель) постройки судов на основе многоагентной системы, позволяющий:

- выполнять планирование процесса постройки судна с учетом подготовительных работ (перемещение материалов, настройка оборудования и т.п.), которые существенно влияют на общее время строительства;

- учитывать в модели пространственные ограничения (например, взаимодействие кранов, расположение оборудования) и человеческий фактор (автономное поведение рабочих).

Исследование проводилось на верфи Asakawa Shipbuilding Co. Ltd. (Япония). Сравнение с реальными статистическими данными показало, что применение симулятора позволяет увеличить эффективность производства за счет сокращения времени простоя и оптимизации последовательности задач. Выявлено, что в реальных условиях значительное время тратится на неэффективные действия, которые можно минимизировать путем выполнения предварительного моделирования.

Gungor et al. [21, 2023] предложен новый подход к планированию процессов судостроения. Исследование выполнялось для условной верфи, обобщающей характеристики нескольких сопоставимых по мощности верфей.

В рамках исследования были поставлены задачи:

- разработки универсальной, целостной и простой платформы планирования для

судостроения, учитывающей неопределенность, сложность и уникальность отрасли;

- синтеза методов динамического, иерархического планирования и дискретно-событийного моделирования для создания гибридного подхода;
- проверки предложенной платформы через эмпирическое исследование.

В результате была создана платформа SHIP/S (иерархически-динамическое имитационное моделирование и метод интегрированного и календарного планирования), объединяющая иерархическое и динамическое планирование с участием агентов (автономных и посредников) и дискретно-событийное моделирование (для проверки отдельных этапов строительства. Созданная платформа позволяет:

- реализовать более эффективный, стандартизированный и менее трудоемкий метод планирования, охватывающий все этапы постройки судна;
- обеспечить высокую точность планирования (небольшие отклонения возможно, связаны с внешними факторами или ограничениями данных).

В процессе апробация платформа показала результаты, сопоставимые результаты с эмпирическими данными, полученными с верфей.

В исследовании Sung et al. [22, 2023] решалась задача создания алгоритма укладки стальных листов на складе предприятия. Исследования проводились на верфи компании HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering (Соннам, Южная Корея).

Авторами предложен двухэтапный алгоритм, предусматривающий:

- использование обучения с подкреплением (агент-критик с асинхронным преимуществом) для определения начального расположения листов на основе графика резки;
- оптимизацию расположения с помощью имитации отжига, учитывающая информацию о партиях.

Алгоритм позволяет учесть календарный график резки и информацию о партиях листов для оптимизации процесса хранения и отгрузки. Алгоритм успешно протестирован на задаче с 200 листами и 20 штабелями на складе, показав снижение количества перекладок листов в процессе формирования партий на резку и укладку листов в порядке, коррелирующим с графиком резки, что подтверждает практическую применимость данного метода. Кроме того, разработанный алгоритм позволяет уменьшить нагрузку на краны за счет комбинации обучения с подкреплением и имитации отжига.

Okubo и Mitsuyuki [23 2023] разработан гибридный метод производственного планирования на основе имитационного моделирования, который удовлетворяет потребности как главных технологов (соблюдение сроков), так и рабочий персонал (обеспечении минимизации простоев и повышение загрузки). Предложенный гибридный метод сочетает прямое и обратное моделирование. Апробация метода проводилась на верфях Kawasaki Heavy Industries Ltd., Energy Solution & Marine Company, Ship & Offshore Structure Division, Saikaijyo Shipyard (Япония). Применение имитационной модели позволило значительно сократить суммарное время простоя линии сборки мелких узлов с соблюдением плановых сроков выпуска.

Kwak et al. [24, 2023] решали задачу оптимизации процесса сборки плоских секций на верфи с использованием комбинации методов программирования в ограничениях и дискретно-событийного моделирования. Исследование направлено на преодоление ограничений традиционных алгоритмов и учет реальных производственных условий. Созданная модель описывает функционирование линии сборки плоских секций при изготовлении партии из 69 секций. Авторами разработан двухэтапный метод оптимизации: модель программирования в ограничениях генерирует возможные последовательности сборки секций, а дискретно-событийная модель

оценивает их с учетом реальных ограничений. Комбинированный подход доказал свою эффективность для оптимизации сборки плоских секций, обеспечивая как требуемую точность, так и практическую применимость в реальных условиях и позволяет учитывать производственные ограничения, которые не могут быть полностью отражены в традиционных алгоритмах.

Pernas-Álvarez и Crespo-Pereira [25, 2023] описана модель программирования в ограничениях для решения задачи оптимизации календарного планирования процесса функционирования сборочного цеха. Исследование проводилось на верфи, связанной с университетом Коруньи (Испания). Модель описывает судостроительное производство, включающее сборку блоков из блок-секций с учетом ограничений на их промежуточное хранение. Модель в ограничениях разработана на языке Python с применением библиотек для импорта данных из Microsoft Excel и последующего экспорта результатов, а также внешних оптимизаторов (Gurobi Optimizer и CP Optimizer) для сравнения результатов. Обработка данных с формированием диаграмм Ганта выполнялась в среде FlexSim. Рассматривались различные сценарии при изменении буферной зоны цеха и количества блоков. Модель помогла найти допустимые решения для крупномасштабных задач (до 75 заданий) в разумные сроки (до 300 сек), в то время как ранее созданная модель с применением методов частично-целочисленного линейного программирования не справилась с этой задачей.

Li et al. [26, 2024] предложен метод оптимизации календарного планирования сборки блоков секций судна с учетом двойных ограничений: рабочих бригад и поставки запасных частей. Исследование проводилось на верфи Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co. Ltd. (Китай). Была разработана математическая модель для задачи календарного планирования с двойным ограничением по ресурсам для цеха с заблокированным потоком и предложен улучшенный алгоритм (IGWO – Improved Grey Wolf Optimization) на базе объединения нелинейных поисковых факторов, динамических весовых коэффициентов и стратегии гауссовой мутации.

Проведенные эксперименты на математической модели подтвердили:

- возможность повышения производительности цеха сборки блоков на 7-8.5% (по сравнению с традиционными оптимизационными методами);
- эффективность в решении мультимодальных задач и избегании локальных оптимумов.

Исследование Kim et al. [27, 2024] выполнено для анализа цепочки поставок элементов трубопроводов для судовых систем. Исследование проводилось на верфи HD Hyundai Sambo Co. Ltd. (Южная Корея).

В рамках исследования:

- разработан аналитический метод на основе теории очередей для анализа характеристик цепочки поставок изготовленных элементов трубопроводов;
- создана дискретно-событийная модель для проверки результатов аналитического метода;
- определены ключевые параметры управления цепочками поставок.

Результаты исследования показали:

- аналитическая и дискретно-событийная модели показывают схожие результаты, что подтверждает их валидность;
- соблюдение плановых сроков выполнения сборки и окраски элементов трубопроводов являются ключевым фактором для снижения сроков строительства;
- минимизация длительности сборочных операций и окраска (не более 10 дней) позволяет снизить общие затраты.

Jeon et al. [28, 2024] разработана имитационная модель для анализа

среднесрочных производственных планов в судостроении. Цель проекта – повышение точности планирования, снижение затрат и времени на утверждение календарных графиков, улучшение производительности верфи. Исследование проводилось на верфи компании HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering HD Hyundai Group, расположенной (Соннам, Южная Корея).

В результате выполнения работ:

- создан алгоритм обработки данных производственного плана до и во время имитационного моделирования, отражающий логику перемещения блоков;
- разработана интегрированная система имитационного моделирования, включающая ограничения верфи и совместимая с системой планирования на предприятии.

Модель позволяет получить такие показатели производительности производственной системы, как загрузка цехов и количество изготовленных блоков, и позволяет предварительно анализировать среднесрочные планы верфи для повышения точности планирования, снижения затрат на разработку календарных графиков.

Выводы

Зарубежное судостроение характеризуется многообразием применяемых средств имитационного моделирования судостроительных производств. Для исследования в большинстве своем используются наиболее распространенные в мире универсальные системы (симуляторы) – Plant Simulation, AnyLogic, ProModel, Arena, Quest, SIMIO, GPSS Word, ExtendSim. Реже применяются универсальные решения (AweSim, Taylor ED, SimSea, FlexSIM, Petri-net, MANA, VSLAM, ModelCenter, BestFit), а также собственные разработки (например, YardPlan). В гораздо меньшей степени используются специализированные программные решения, «заточенные» под судостроение. Наиболее характерный пример – это специализированное приложение Simulation Toolkit Shipbuilding (Германия) в связке с промышленным симулятором Plant Simulation.

Ведущие страны, где активно ведутся имитационные исследования в судостроении – США, Южная Корея, Япония, Китай, Германия, Бразилия, Хорватия, Испания, Великобритания, Канада, Бразилия, Норвегия, ЮАР, Турция, Австралия.

Имитационные исследования сосредоточены по большей части на моделировании работы стапельных мощностей, группы корпусных цехов (корпусообработывающие, сборочно-сварочные, окрасочные участки) и основных монтажных производств.

Имитационные исследования в основном ведутся в рамках парадигмы дискретно-событийного моделирования. Для процессного моделирования активно используется система AnyLogic благодаря гибкости и возможности совмещения дискретно-событийного моделирования с другими подходами – агентным моделированием и системной динамикой. Характерно применение совместно с имитационным исследованием методов линейной оптимизации.

Ярко выражена тенденция к интеграции имитационных моделей с информационными системами и системами планирования предприятий – в основном для целей получения исходных данных для моделирования и верификации производственных планов.

Основные задачи, решаемые при выполнении имитационных исследований на действующих судостроительных предприятиях и верфях, следующие:

- моделирование материальных потоков верфи, определение «узких мест» в производстве, оптимизация работы производственного оборудования;
- планирование мощностей и производственной логистики для целей минимизации времени простоев и сокращения производственных затрат;

- моделирование производственных процессов в цепочках узел – секция – блок – корпус судна;
- моделирование загрузки производственного персонала и оборудования, включая стапельные сооружения, для проверки выполнимости производственной программы.

Активно развиваются направления планирования с применением имитационных моделей в условиях неопределенностей:

- создание динамических расписаний, адаптирующихся к изменениям, таким как задержки поставок комплектующего оборудования или изменения в проекте судна (динамическое планирование);
- тестирование различных сценариев для оценки их влияния на общие сроки строительства и загрузку ресурсов верфи (сценарное моделирование).

Разработка промышленных имитационных моделей, адекватных реальной производственной системе, требует глубокого понимания процессов строительства судов и выполнения тщательной постановочной части.

Сопоставляя работы зарубежных исследователей с практикой применения имитационного моделирования в российской судостроении за аналогичный период времени¹, авторы сделали вывод о том, что российские специалисты не только не отстают от своих зарубежных коллег, но в ряде решаемых задач и применяемых программных решений где-то и опережают их.

Имитационное моделирование эволюционировало от инструмента для решения узких инженерных задач до сквозной технологии, которая сопровождает судно на этапах его жизненного цикла – от первоначальной концепции и проектирования до постройки и сдачи заказчику. Имитационное моделирование становится неотъемлемой частью современного судостроения, позволяя эффективно управлять сложными и изменчивыми производственными процессами.

Авторы выражают благодарность Плотникову А.М., начальнику отдела информационных технологий АО «ЦТСС» (Санкт-Петербург), за методическое руководство при подготовке данного обзора.

Литература

1. **Красильников А.Б.** Россия на рынке мирового судостроения: тенденции и перспективы // Международный научно-исследовательский журнал «Прогрессивная экономика», № 5 / 2025, DOI: 10.54861/27131211_2025_5_291. С. 291-302.
2. **Hadjina, M.** Shipbuilding production process design methodology using computer simulation / M. Hadjina, N. Fafandjel, T. Matulja // Brodogradnja. 2015. Vol. 66. № 2. P. 77-91.
3. **Wang, C.** Ship block logistics simulation based on discrete event simulation / C. Wang, Y.- sheng Mao, Z.- quan Xiang, Y.- qing Zhou // International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE). 2015. Vol. 11. № 6. P.16-21. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijoe.v11i6.4968>.
4. **Yong-Kuk Jeong, Byeong-Seop Kim, Jong-Gye Shin, Philippe Lee, Jong Hun Woo, Jong Moo Lee.** A ship block logistics support system based on the shipyard simulation framework // Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference T. M. K. Roeder, P. I. Frazier, R. Szechtman, E. Zhou, T. Huschka, and S. E. Chick, eds., eds. 2016. Vashington, D.C., USA. PP.3672-3673.

¹ Труды всероссийской научно-практической конференции «ИММОД», международной научно-практической конференции «ИКМ МТМТС», публикации в журнале «Судостроение».

5. **Cebral-Fernandez, M.** Improving planning and resource utilization of a shipbuilding process based on simulation / M. Cebral Fernandez, D. Crespo-Pereira, A. Garcia-del-Valle, M. Rouco-Couzo // In: Proceedings of the European modeling and simulation symposium. Larnaca. 2016. P. 197-204.
6. **Cebral-Fernández M.** Application of a multi-level simulation model for aggregate and detailed planning in shipbuilding / M. Cebral-Fernández, M. Rouco-Couzo, M. Q. Pazos, D. Crespo-Pereira, A. García del Valle, R. M. Abeal // In: Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference (WSC). Las Vegas, NV, USA. 2017. P. 3864-3875. DOI: <https://doi.org/10.1109/WSC.2017.8248097>.
7. **Wibke Kusturica, Christoph Laroque, Deike Gliem, Jana Stolipin, Sigrid Wenzel.** A ship block logistics support system based on the shipyard simulation framework // Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference M. Rabe, A.A. Juan, N. Mustafee, A. Skoogh, S. Jain, and B. Johansson, eds. 2018. Gothenburg, Sweden. PP.3910-3920.
8. **Dylan M. Dwyer and Brett A. Morris.** A Ship Performance Modelling and Simulation Framework to Support Design Decisions throughout the Capability Life Cycle: Part 1 – Risk Mitigation and Requirement Setting // Defence Science and Technology Group. 2018. P.66.
9. **Peng, X.** Discrete system modeling for large ship subsection welding workshop based on plant simulation / X. Peng, F. Wei, L. Qi, C. Yunshan, W. Qiong // In: Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering (AMCCE 2018). Atlantis Press. 2018. P. 502-509. DOI: <https://doi.org/10.2991/amcce-18.2018.87>.
10. **Jeong, E.** design of integrated process-based model for large assembly blocks considering resource constraints in shipbuilding / E. Jeong, D. Jeong, Y. Seo // Journal of the Korea Society for Simulation. Vol. 28. № 2. 2019. P. 107-117. DOI:10.9709/JKSS.2019.28.2.107 (in Korean).
11. **Goo, B.** Layered discrete event system specification for a ship production scheduling model / B. Goo, H. Chung, S. Han // Simulation modelling practice and theory. 2019. – Vol. 96. 101934. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2019.101934>.
12. Genc Y., Ozkok M. Simulation-based optimization of the sea trial on ships // Journal of ETA Maritime Science, JEMS, 2020; 8(4): 274-285.
13. **Ju, S.** System development for establishing shipyard mid-term production plans using backward process-centric simulation / S. Ju, S. Sung, H. Shen, Y. Jeong, J.G. Shin // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. Vol. 12. 2020. P. 20-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2019.05.005>.
14. **Sender J., Klink S., Flügge W.** Method for integrated logistics planning in shipbuilding // Procedia CIRP. Vol. 88. 2020. P. 122-126. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.022.
15. **Jeong, D.** A Process-based modeling method for describing production processes of ship block assembly planning / D. Jeong, D. Kim, T. Choi, Y. Seo // Processes. 2020. Vol. 8. № 7. 880. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8070880>.
16. **Lee, Y. G.** Simulation-based planning system for shipbuilding / Y. G. Lee, S. Ju, J. H. Woo // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. Vol. 33. № 6. 2020. P. 626-641. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1775304>.
17. **Mao, X.** Research on Collaborative planning and symmetric scheduling for parallel shipbuilding projects in the open distributed manufacturing environment / X. Mao, J. Li, H. Guo, X. Wu // Symmetry. Vol. 12. № 1. 2020. 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym12010161>.

18. **Liu, M.** Integrated modelling and simulation method for the project-type manufacturing process: shipyard dock shop hoisting process / M. Liu, Z. Yang, M. Meng // In IEEE Access. Vol. 9. 2021. P. 89999-90010. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3091470>.
19. **Okubo, Y.** Ship production planning using shipbuilding system modeling and discrete time process simulation / Y. Okubo, T. Mitsuyuki // Journal of Marine Science and Engineering. Vol. 10. № 2. 2022. 176. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10020176>.
20. **Taniguchi, T.** Development of high precision process simulation based on multi-agent system for shipbuilding / T. Taniguchi, M. Takezawa, K. Matsuo // Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. Vol. 36. 2022. P. 89-100. DOI: <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.36.89> (In Japanese).
21. **Gungor, A.** A novel approach for planning of shipbuilding processes / A. Gungor, Y. Unsan, B. Barlas // Brodogradnja. Vol. 74. № 4. 2023. P. 17-39. DOI: <https://doi.org/10.21278/brod74402>.
22. **Sung, S.** Deep reinforcement learning with discrete event simulation for steel plate stacking problem / S. Sung, Y. Cho, S. Sung, S.Y. Son, H. Yoon, J. H. Woo // In: Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference, (WSC). 2023. https://informs-sim.org/wsc23papers/by_area.html.
23. **Okubo, Y.** Study of the practical application of production planning method using shipbuilding process simulation / Y. Okubo, T. Mitsuyuki // Nihon Sempaku Kaiyou Kougakkai .Rombunshuu. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.37.115> (In Japanese).
24. **Kwak, D.H.** Optimization of flat block assembly line using constraint programming and discrete-event simulation / D.H. Kwak, J.H. Woo, K.Y. Cho, H.C. Yoon // In: Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference, (WSC). 2023. https://informs-sim.org/wsc23papers/by_area.html.
25. **Pernas, J.** A constrained programming model for the optimization of industrial-scale scheduling problems in the shipbuilding industry / J. Pernas, D. Crespo-Pereira // Journal of Marine Science and Engineering. Vol. 11. № 8. 2023. 1517. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11081517>.
26. **Li, J.** Scheduling optimization of ship plane block flow line considering dual resource constraints / J. Li, P. Lin, X. Wu, D. Song, B. Yang, L. Zhou // Scientific Reports. Vol. 14. 2024. 30765. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80785-5>.
27. **Kim, I.** An analysis of pipe spool supply chain in shipbuilding using 2-stage queuing model and discrete event simulation / I. I. Kim, S.-H. Nam, J. H. Woo // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. Vol. 16. 2024. 100611. ISSN 2092-6782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2024.100611>.
28. **Jeon, J.** Simulation modeling methods for analysis and validation of mid-term production plan operations in shipyard / S. Jeon, Y. Kim, J. Yun and et al. // In: Proceedings of the 2024 Winter Simulation Conference, (WSC). 2024. https://informs-sim.org/wsc24papers/by_area.html.