

УДК 004.942:658.51:629.5

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИМИТАЦИОННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ СРОКОВ СТРОИТЕЛЬСТВА СУДОВЫХ ЗАКАЗОВ

М.А. Долматов, Ю.А. Железов, А.М. Плотников (Санкт-Петербург)

Определение сроков строительства судовых заказов является актуальной задачей для судостроительных предприятий. При традиционном подходе сроки строительства судов определяются (обосновываются) расчетным методом в соответствии с отраслевым нормативным документом РД5Р.ГКЛИ.0502-185 [1].

При расчете по РД5Р.ГКЛИ.0502-185 используются обобщенные статистические данные по трудоемкости. Формульные выражения привязаны к типам и классам судов и диапазонам водоизмещений. Условия постройки на конкретном предприятии опосредованно учитываются через набор коэффициентов: коэффициент специализации, коэффициент метода постройки, коэффициент серийности.

Практический опыт применения методов имитационного моделирования для решения задачи оценки сроков строительства судов был получен АО «ЦТСС» (Санкт-Петербург) в период с 2023 по 2024 г. в рамках выполнении работ по договору на проведение технологической экспертизы сроков строительства двух многофункциональных научно-исследовательских судов проекта 123 (заводские номера заказов – 071 и 072), строящихся на ООО «ССК «Звезда» (Большой Камень, Приморский край). Договором предусматривалось выполнение технологической экспертизы традиционным расчетным методом с дальнейшей верификацией результатов расчета путем проведения серии экспериментов на имитационной модели.

Суда проекта 123 предназначены для проведения морских научно-исследовательских работ фундаментального и прикладного назначения, включая гидрографические, биологические, метеорологические, геофизические и другие виды исследований в акваториях Мирового океана. Район их плавания неограниченный, включая арктические моря (с учетом символа класса судна), устья рек и заливы, а также другие районы Мирового океана, в том числе тропические.

Конструктивные особенности судов: стальной корпус с удлиненным баком, со сдвинутой в нос жилой надстройкой, с открытой палубой в кормовой части, со средним расположением машинного отделения, с главной дизель-электрической энергетической установкой, с двумя винторулевыми колонками и двумя носовыми выдвижными азимутальными подруливающими устройствами. Класс судна KM Arc4 (hull, machinery) Российского морского регистра судоходства. Длина каждого судна – 122,5 м, ширина – 20,0 м, осадка – 5,6 м, автономность – 50 сут, водоизмещение порожнем – 6640 т.

Необходимо пояснить, откуда вообще появилась необходимость проведения технологической экспертизы сроков строительства судов.

Начало строительства заказов по контракту у предприятия – декабрь 2020 г. Первоначально контрактными датами поставки судов заказчику являлись для заказа 071 – 31 августа 2024 г., а для заказа 072 – 5 декабря 2024 г.

За прошедший период дважды, в 2021 г. из-за изменения класса судов и в 2022 г. из-за санкционных ограничений, производились изменения исходных технических требований на судовое оборудование и выполнялась соответствующая корректировка проектной документации, что привело к необходимости дополнительного финансирования, поиска поставщиков оборудования и пересмотру сроков строительства. Соответственно, в определенный момент строительство было приостановлено.

В период проведения технологической экспертизы у Заказчика утвержденными были следующие сроки сдачи судов:

- заказ 071 – июль 2027 г.;
- заказ 072 – август 2029 г. (при этом строительство заказа законсервировано с января 2024 по май 2026 г.).

На момент, когда должно быть возобновлено строительство, процент технической готовности составлял для заказа 071 – 8,7%, для заказа 072 – 8,07%). Трудоемкость строительства головного заказа 071 составляет 1 574,1 тыс. нормо-ч (1 461,6 тыс. чел. ч), а трудоемкость второго заказа 072 – 1 448,2 тыс. нормо-ч (1 344,7 тыс. чел. ч).

Разработанная укрупненная имитационная модель производства ООО «ССК «Звезда» охватила все основные этапы строительства заказов 071 и 072 – от поступления рабочей конструкторской документации до сдачи заказов.

В имитационную модель – с разной степенью детализации производственных процессов – были включены следующие виды производства:

- корпусообрабатывающее (включая склад металла);
- сборочно-сварочное (участки изготовления плоских и объемных секций);
- корпусостроительное (открытый достроечный тяжелый стапель);
- механомонтажное (на уровне привлекаемых бригад);
- производство по монтажу изоляций, лакокрасочным покрытиям и гальванохимическим покрытиям (окрасочные камеры);
- испытания и сдача заказов (включая достроечную набережную и глубоководный пирс).

Учитывалось соответствующее крановое и транспортное оборудование (мультивиллеры, самоходная транспортная система, транспортно-передаточный док).

Также учитывалась длительность технологической подготовки производства в части обработки проектной документации и выпуска комплектов технологической документации для корпусообрабатывающего и сборочно-сварочного производств.

Длительность технологической подготовки производства была принята две недели на одну секцию (по данным предприятия), это использовалось в модели в качестве ограничения, определяющего последовательность и возможность запуска секций в производство.

Данные по срокам поставки основного крупногабаритного оборудования использовались в качестве ограничений при моделировании, определяющих последовательность и возможность насыщения секций после формирования блоков на стапеле.

В качестве исходной информации для создания имитационной модели строительства заказов были использованы следующие данные, полученные с предприятия:

- генплан предприятия с экспликацией;
- планировки производственных цехов и участков и состав технологического оборудования, задействованных при строительстве заказов;
- характеристики построечных мест (длина, ширина, крановое оснащение) и достроечных набережных (длина, крановое оснащение);
- перечень, численность и специализация бригад, задействованных при строительстве заказов;
- данные по режиму (сменности) работы производства в целом, а также участков корпусообрабатывающего, сборочно-сварочного (включая очистку и окраску секций), корпусостроительного и механомонтажного производств;

- разбивка корпусов заказов на сборочные единицы (секции и блоки, крупные фундаменты) с их массо - габаритными характеристиками;
- данные по разбивке заказов на строительные районы (перечень и список помещений в них входящих), помещения (перечень и список сборочных единиц их образующих);
- номенклатура и характеристики основного крупногабаритного оборудования для заказов (с привязкой к судовым помещениям), графики поставки оборудования;
- графики поступления рабочей конструкторской документации на секции заказов 071 и 072 от проектной организации;
- графики строительства заказов 071 и 072;
- графики строительства заказов текущей производственной программы предприятия (кроме заказов 071 и 072);
- принципиальная технология строительства заказов 071 и 072, последовательность формирования их корпусов на построечном месте, определенная в соответствии с принятой технологией и графиками строительства;
- статистика по длительности операций транспортировки секций и блоков, крупного оборудования, выполняемых посредством кранового и транспортного оборудования (перечень и характеристики такого оборудования);
- статистика по длительности операций резки металла на секции, окраски секций, сборки секций и блоков, монтажа основного крупногабаритного оборудования большой массы;
- данные по трудоемкости оставшихся работ по заказам 071 и 072 на момент начала технологической экспертизы (с разбивкой по видам производств);
- суммарная трудоемкость производства прочих заказов судостроения в планируемый период строительства заказов 071 и 072;
- схемы материальных потоков между основными производствами, а также внутри отдельных производств;
- данные о сроках завершения работ на открытом стапеле по другим заказам производственной программы предприятия.

В связи с отсутствием в составе переданных исходных данных части статистики по длительности выполнения подготовительных и транспортировочных операций были приняты усредненные длительности операций, определенные экспертным методом на основе отраслевой статистики, полученной с других судостроительных предприятий. В числе таких операций: строповка секции, блока и оборудования; погрузка оборудования в блок и на заказ; перемещение секции краном внутри цеха, перемещение секции на окраску и после окраски на стапель на мультивиллере; перемещение оборудования со склада на стапель и нек. др.

Длительность монтажа крупногабаритного оборудования «малой» массы была определена экспертным методом в зависимости от его массы следующим образом:

- оборудование массой от 8,1 до 13 т – 320 ч;
- оборудование массой от 3,1 до 8 т – 160 ч;
- оборудование массой от 1,3 до 3 т – 80 ч;
- оборудование массой до 1,2 т – 40 ч.

Местом постройки корпусов заказов предприятием был принят открытый стапель, метод постройки судов – блочно-секционный.

При разработке имитационной модели был учтен достаточно большой набор ограничений и особенностей организации производства, определенных Заказчиком, в частности:

- сборка корпусов заказов 071 и 072 должна выполняться на открытом стапеле⁵;
- для изготовления плоских и объемных секций заказов 071 и 072 выделяется ограниченное количество стендов и коксовых постелей – 11 ед;
- для формирования блоков заказов закреплены 4 участка на второй нитке открытого стапеля, работы выполняются в 2 смены;
- формирование блоков и корпусов заказов 071 и 072 на открытом стапеле должно выполняться последовательно по мере высвобождения стапельной позиции на второй нитке, работы выполняются в две смены;
- работы по заказу 072 должны быть заморожены на период с 1 января 2024 г. по 30 мая 2026 г.;
- поставка крупногабаритного оборудования выполняется сразу на два заказа;
- монтаж крупногабаритного оборудования в блоках и корпусах заказов выполняется с привлечением бригад механомонтажного производства, работы выполняются в две смены;
- для изготовления объемных секций выделяется пять бригад, для изготовления плоских секций – шесть бригад;
- для очистки, окраски и сушки секций выделяется семь бригад малярного цеха (трехсменный режим работы);
- достройка судов после спуска выполняется у глубоководного пирса или у достроечной набережной.

В качестве инструментальной среды для разработки укрупненной имитационной модели строительства заказов 071 и 072 проекта 123 было применено специализированное приложение АС «Сириус» 2.0 [2], созданное специалистами АО «ЦТСС» и ООО «Элина-Компьютер» (Казань) на базе отечественного симуляционного ядра GPSS World Core.

Автоматизированная система «Сириус» 2.0 неоднократно применялась при оценке технологических решений в рамках разрабатываемых АО «ЦТСС» проектов модернизации (реконструкции) судостроительных предприятий, а также в проектах создания новых судостроительных мощностей [3, 4]. Для оценки сроков строительства заказов (точнее, достройки ранее заложенных и затем на некоторое время приостановленных в постройке заказов) система АС «Сириус» 2.0 была использована впервые.

На основе предоставленной предприятием исходной информации была разработана укрупненная имитационная модель, описывающая функционирование фрагмента производственной системы предприятия, задействованного в строительстве только заказов 071 и 072 проекта 123.

Применение имитационной модели позволило, в частности, учесть продолжительность технологической подготовки производства в части обработки рабочей конструкторской документации и выпуска комплектов технологической документации для корпусообрабатывающего и сборочно-сварочного производств в качестве ограничивающего фактора, определяющего последовательность и возможность запуска секций в производство. Также учитывались данные из графиков поставок крупногабаритного оборудования.

Для валидации созданной имитационной модели на ней был выполнен единичный расчет (прогон). Длительности выполнения работ, полученные по результатам расчета на модели, сравнивались с плановыми длительностями, определенными с утвержденных на предприятиях графиков строительства заказов. При

⁵ Помимо открытого стапеля предприятие располагает сухим доком.

этом, сравнение выполнялось не только по общим срокам строительства заказов, но и по длительности изготовления отдельных сборочных единиц.

Моделирование выполнялось с учетом технической готовности секций по состоянию на начало моделирования и режима работы производственных бригад участков изготовления плоских и объёмных секций в две смены, а участка очистки и окраски секций – в три смены.

Результаты расчета (прогона) приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1. Результаты единичного расчета на модели

Заказ / программа в целом	Длительность постройки, дней ⁶		Расхождение сроков	
	плановая	модельная	дней	%
071	1242	1486	244	19,6
072	1179	1517	338	28,6
Программа в целом	2025	2363	338	16,7

При пересчете на месяцы длительности строительства заказов, определенные расчетом на имитационной модели, составили:

- для заказа 071 – 48 мес. 25 дней;
- для заказа 072 – 49 мес. 26 дней.

Срок реализации производственной программы из двух заказов в целом составил 77 мес. 21 день.

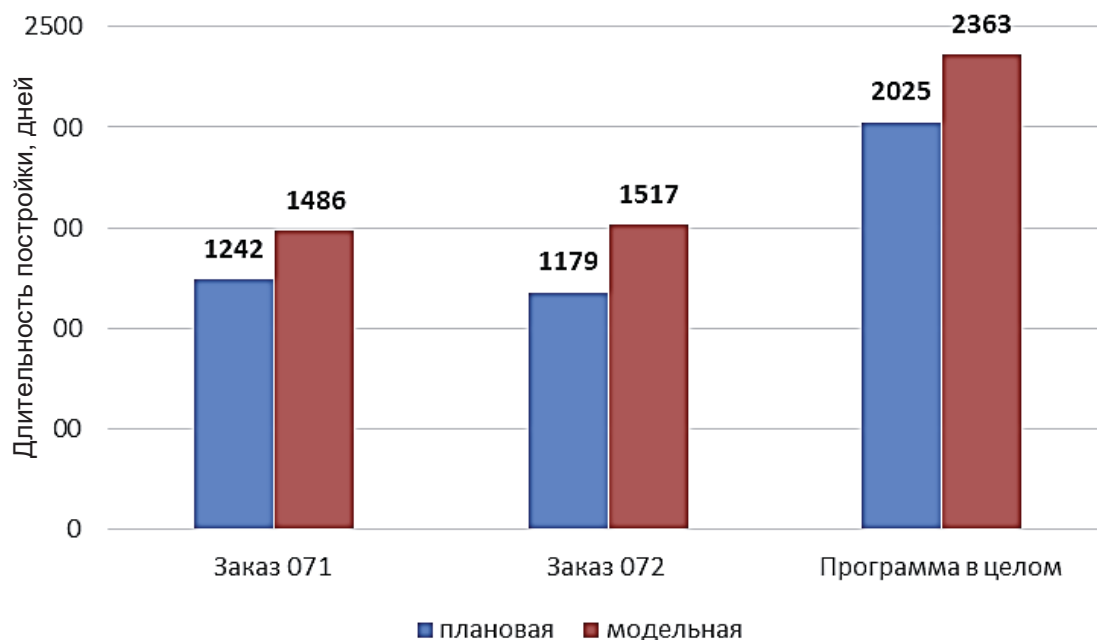


Рис. 1. Сравнение длительностей постройки заказов и программы в целом

Сравнение результатов моделирования с результатами, полученными расчетным методом на основе отраслевого руководящего документа РД5Р.ГКЛИ.0502-185, показало, что они отличаются от плановых показателей в большую сторону. Такие

⁶ Здесь и далее указываются календарные дни.

результаты обусловлены недостаточностью выделенных предприятием ресурсов под строительство заказов 071 и 072 (построечных мест и бригад), а также заданным неоптимальным режимом работы производства (сменностью).

Расхождение с плановыми сроками выполнения программы в целом составляет не более 17 процентов; по мнению авторов разработанная имитационная модель является валидной и пригодна для проведения технологической экспертизы сроков строительства заказов 071 и 072.

На основе разработанной имитационной модели была проведена серия экспериментов, подробнее остановимся на двух из них.

Эксперимент № 1. Выполнение расчета на имитационной модели для определения сроков строительства отдельных заказов в составе производственной программы и производственной программы в целом с учетом фактического выполнения работ по состоянию на 06.02.2024 и их сравнение с контрактными сроками при условии работы в 3 смены.

Результаты эксперимента № 1 приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Полученные результаты показали, что при изначально спланированных режимах работы участков и численности привлекаемых к изготовлению секций бригад обеспечить реализацию производственной программы в контрактные сроки невозможно. Одним из возможных путей обеспечения выполнения строительства заказов в плановые сроки является перевод всех задействованных в строительстве заказов бригад на трехсменный режим работы. При этом, все бригады, задействованные в изготовлении секций для заказов, не должны выполнять работы по заказам других проектов.

Таблица 2. Результаты эксперимента № 1

Заказ / программа в целом	Длительность постройки, дни	
	при работе в 2 и 3 смены	при работе только в 3 смены
Заказ 071 (плановый показатель)	1242	—
Заказ 071 (расчет на модели)	1486	1044
Заказ 072 (плановый показатель)	1179	—
Заказ 072 (расчет на модели)	1517	1080
Программа в целом (плановый показатель)	2025	—
Программа в целом (расчет на модели)	2363	1926

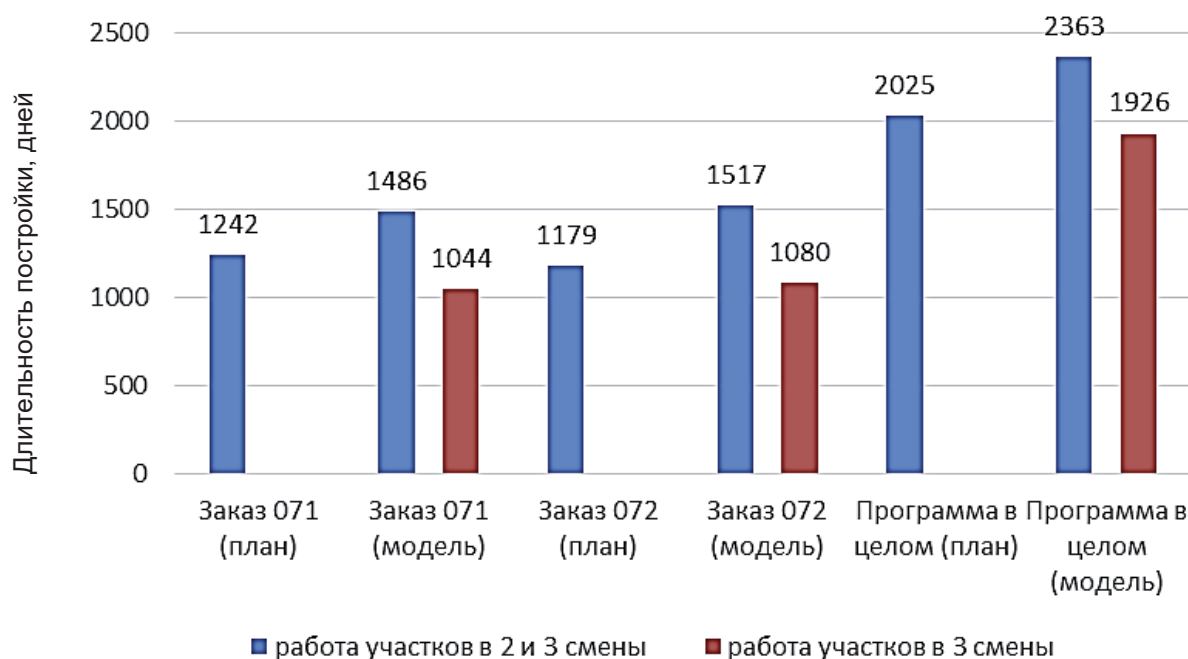


Рис. 2. Сравнение длительностей постройки заказов и программы в целом (плановые и модельные значения)

Сводные результаты, показывающие возможность сокращения сроков постройки заказов за счет изменения сменности работы производственных участков, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Длительность постройки заказов и программы в целом в зависимости от сменности работы

Заказ / программа	Длительность постройки (плановая), месяцев	Длительность постройки (модельная), месяцев		Сокращение сроков постройки, (для варианта работы в 3 смены)	
		работа участков в 2 и 3 смены	работа участков в 3 смены	месяцев	в %
071	40,76	48,83	34,33	6,43	15,8
072	38,73	49,86	35,50	3,23	8,3
Программа в целом	66,50	77,70	63,33	3,20	4,8

Эксперимент № 2. Выполнение серии расчетов на имитационной модели для анализа влияния возможного срыва срока поставок крупногабаритного оборудования в составе заказов на длительность строительства отдельных заказов в составе производственной программы и производственной программы в целом – на 12, 24, 36 и 48 месяцев от планового срока. Выбор данного крупногабаритного оборудования обусловлен тем, что оно входит в насыщение блока №1 основного корпуса, формируемого последним на стапельной позиции.

Таблица 3. Результаты эксперимента № 2

Заказ	Увеличение срока строительства заказов (в днях) при задержке поставки оборудования на:			
	12 месяцев	24 месяца	36 месяцев	48 месяца
071	0	260	565	931
072	0	0	0	0

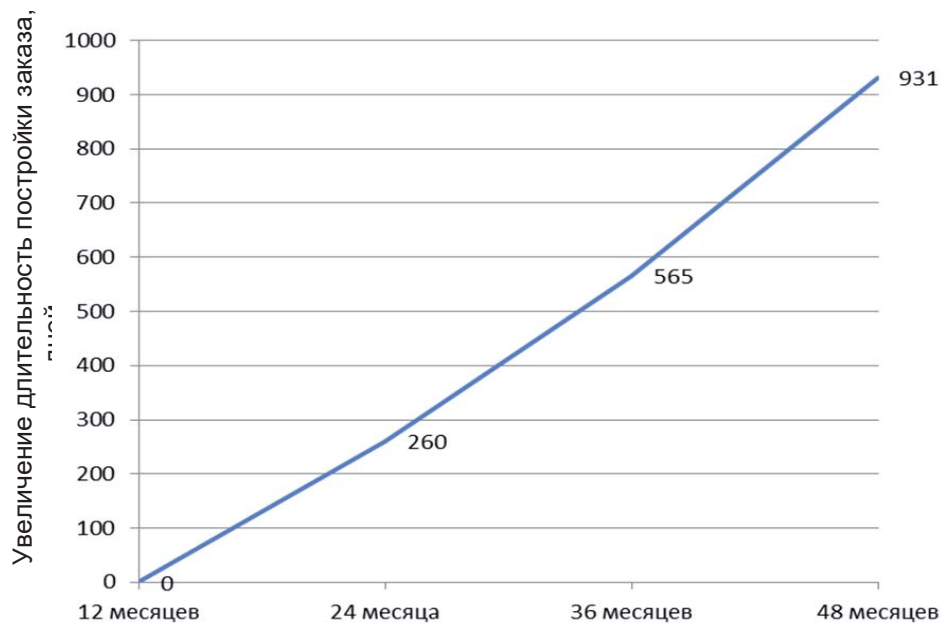


Рис. 3. Результаты эксперимента № 2

Выводы

Применение имитационного моделирования при проведении технологической экспертизы позволило определить длительность постройки в отдельности заказов 071 и 072 проекта 123 и производственной программы в целом с учетом различных ограничивающих факторов. Спрогнозированы последствия срыва поставок отдельного комплектующего оборудования и сформированы рекомендации по мероприятиям, позволяющим обеспечить постройку отдельных заказов и производственной программы в контрактные сроки.

Исследование на укрупненной имитационной модели показало, что реализация производственной программы с учетом выделяемых предприятием для строительства заказов 071 и 072 производственных ресурсов, принятой сменности, при утвержденных сроках поставки основного комплектующего оборудования и принятых сроках поставки проектной документации реализовать производственную программу в контрактные сроки невозможно.

Возможными путями обеспечения выполнения строительства заказов в заявленные сроки являются:

- перевод всех задействованных в строительстве заказов 071 и 072 бригад на трехсменный режим работы (с соответствующим увеличением численности производственного персонала);
- привлечение дополнительных производственных мощностей под заказы проекта 123.

Проведение технологической экспертизы сроков строительства судовых заказов посредством специализированного приложения АС «Сириус» 2.0 можно рассматривать как реальный пример проактивного мониторинга и управления сложными техническими системами, к которым относится судостроительное производство [5, 6]. Проактивный мониторинг и управление в отличие от традиционно используемого на практике «реактивного» управления предприятиями, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение инцидентов, предполагает предотвращение их возникновения за счет создания новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий. Подобные воздействия основываются на «парировании» не следствий, а причин, вызывающих возможные нештатные и кризисные ситуации на предприятии (в нашем случае – прогнозирование возможности выполнения контрактных обязательств). Прогнозирующие и упреждающие возможности базируются, прежде всего, на результатах имитационного моделирования рассматриваемых производственных процессов.

Рассмотренный в настоящей статье подход, впервые примененный в практике отечественного судостроения, подтвердил свою эффективность.

Программные средства АС «Сириус» 2.0 позволяют учесть при моделировании судостроительных производств такие ограничивающие факторы, как состав доступных ресурсов (технологическое, транспортное и крановое оборудование, производственные бригады), сменность, сроки поступления проектно-конструкторской документации, длительность выполнения плазово-технологической подготовки производства, сроки поставки комплектующего оборудования, ледостав, временное «замораживание» работ на заказах и т.п.

В перспективе регулярное применение инструментальных средств имитационного моделирования при проведении технологических экспертиз сроков постройки заказов позволит оценивать длительность как постройки отдельных заказов, так и выполнения программы в целом с учетом значительного большего, чем при расчетном (ручном) методе, наборе ограничивающих параметров и возмущающих факторов. По результатам таких имитационных экспертиз могут быть подготовлены соответствующие рекомендации и доказательная база по мероприятиям, позволяющим обеспечить постройку отдельных судовых заказов и производственной программы в целом в заданные контрактом сроки.

Литература

1. РД5Р.ГКЛИ.0502-185-94. Руководящий документ. Продолжительность постройки судов. Нормативы. ЦНИИ ТС. СПб., 1994. 53с.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018614213 от 03.04.2018 г. Приложение для автоматизированной генерации имитационных моделей, их хранения и проведения экспериментов (АС «Сириус» 2.0). Правообладатель АО «Центр технологии судостроения и судоремонта».
3. Долматов М.А., Плотников А.М. Особенности разработки и внедрения имитационных моделей функционирования производственных систем судостроительных предприятий // 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). Редакторы Плотников А.М., Долматов М.А., Смирнова Е.П. СПб., 2021. С. 183-186.

4. **Плотников А.М., Долматов М.А., Девятков В.В.** Вопросы имитационного (комплексного) моделирования судостроительных производств // Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-20213). Труды конференции (ISBN 978-5-6050031-8-2). СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. 272 с. С.176-185.
5. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Юсупов Р.М., Стыскин М.М., Джао В.Ю-Д.** Концепция и технологии проактивного управления жизненным циклом изделий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. Номер: 2, С 158-63.
6. **Соколов Б.В., Зеленцов В.А., Пиманов И.Ю., Юсупов Р.М.** Комплексное моделирование и проактивное управление сложными объектами в условиях чрезвычайных ситуаций // Десятая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание), 20–22 октября 2021 г., СПб.: АО «ЦТСС», 2021. 694 с. ISBN 978-5-905526-05-3. С. 65-76.