

УДК 519.876.5

## Применение имитационного моделирования в процессах постройки судна

**Соколов Сергей Сергеевич** — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Комплексное обеспечение информационной безопасности». E-mail: sokolovss@gumrf.ru

**Антонова Алена Евгеньевна** — аспирант кафедры «Комплексное обеспечение информационной безопасности». Область научных интересов: автоматизация производственных процессов, имитационное моделирование. E-mail: antonovaae@gumrf.ru

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Россия, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

**Для цитирования:** Соколов С. С., Антонова А. Е. Применение имитационного моделирования в процессах постройки судна // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2024. № 3 (39). С. 44–51. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-44-51

***Аннотация.** В данной статье представлен пример применения метода имитационного моделирования процессов постройки судна в ПО AnyLogic. Кратко описывается процесс и характеризуется логистика постройки баржи, производимой на верфях, подготовлена карта производственного процесса. В заключение предложены три возможных варианта модернизации, которые заключаются в технологических, организационных улучшениях и сочетании обоих этих решений. ПО AnyLogic использовалось для сравнительного анализа предложенных вариантов применительно к процессу в базовом варианте. Этот метод позволяет получить точные данные для принятия обоснованных решений без необходимости проведения физических тестов. Применение имитационного моделирования является ключевым инструментом для оптимизации процессов судостроения и дальнейшего развития отрасли.*

***Ключевые слова:** имитационное моделирование, картографирование процессов, усовершенствование процессов, судостроительная промышленность*

### Введение

Процесс постройки судна является сложным и многоэтапным производством, включающим различные операции, от проектирования и сборки до испытаний и сдачи готового судна. Вместе с тем эффективная производственная логистика играет ключевую роль в обеспечении оптимальной работы и экономической эффективности судостроительных предприятий [1]. Для улучшения производственной логистики и оптимизации процесса постройки судна можно использовать имитационное моделирование.

Применение имитационного моделирования в судостроительной отрасли позволяет оценить различные варианты производственных сценариев, их эффективность и потенциальные улучшения перед внедрением на практике. С помощью имитационного моделирования можно провести анализ процессов постройки судна, начиная с поставки материалов и заканчивая сдачей готового судна [2]. Моделирование позволяет определить оптимальные параметры для достижения максимальной производительности предприятия, минимизации

временных и финансовых затрат, а также обеспечения устойчивости и надежности производственных процессов.

Одним из основных преимуществ применения имитационного моделирования в судостроительной отрасли является возможность проведения симуляций в условиях, близких к реальным, без необходимости тратить время и ресурсы на проведение физических тестов и экспериментов [3]. Таким образом, предприятия могут принимать обоснованные решения на основе точных данных, полученных в результате моделирования.

Картирование процессов — это метод, который заключается в графическом отображении функционирования данного процесса или группы процессов, операций и представлении связей между ними. Однако в большинстве случаев необходимо понимать, из каких действий состоит такой процесс [4].

На технологической карте представлены конкретные действия, которые объединяются в материальные, информационные и финансовые потоки в данном процессе. Такие схемы часто дают менеджерам самое первое всеобъемлющее представление о том, как работает данный процесс. Эксперты разработали набор графических символов, которые представляют различные аспекты процес-

са [5]. На рис. 1 представлены наиболее распространенные символы.

### Особенности постройки барж

Первый шаг по подготовке к постройке барж — это отправка списков материалов в отделы снабжения и контроля качества. Отдел снабжения размещает заказы на материалы в соответствии с перечнем материалов, за который отвечает отдел контроля качества, выполняющий их проверку на основе документации и сертификатов.

Следующим шагом является сбор заказанных материалов, которые хранятся на территории предприятия: часть из них — на складе, а большие металлические листы — на открытом воздухе. Затем они маркируются в зависимости от размера, толщины, типа и т. д. Транспортный отдел занимается их доставкой в производственный цех. Обработка материала осуществляется многоканальным способом [6]. Металлические листы различных форматов подаются на станок термической резки с ЧПУ (компьютеризированное числовое управление), где сначала маркируются определенные элементы листа, а затем ранее маркированные элементы вырезаются в соответствии с документацией, переданной в компьютер станка. Некоторые из них позже подвергаются обработке (например, придают

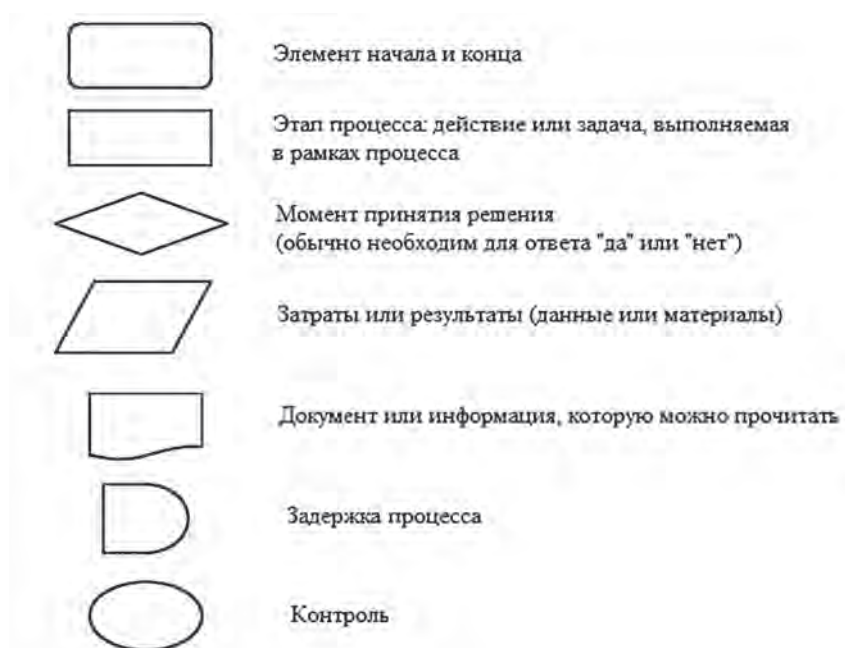


Рис. 1. Наиболее распространенные символы, используемые на картах процессов

форму) на других стойках. Созданные таким образом элементы затем передаются сборочным группам, состоящим из монтажников и сварщиков. Монтажники используют эти элементы для сборки конструкции (с контактными сварными швами), например, секции, корпуса, опоры моста и т. д., в то время как сварщики завершают всю работу.

На этапе изготовления отдельных секций барж происходит так называемая строительная правка, чтобы не возникло неправильного совмещения при сборке секций вместе в секции большего размера. Чтобы наилучшим образом использовать время, работы, связанные с усилением конструкции, выполняются по мере сварки блока [7]. Баржи оснащены всеми видами пропусков и патрубков для водяных, электрических, воздушных, канализационных и нефтяных установок. Однако если данный блок закончен, проводится контроль качества сварных швов и испытания на герметичность.

Следующими производственными этапами являются шлифовка, металлизация и покраска. Шлифование заключается в очистке поверхности материала от всех видов загрязнений с помощью пескоструйной обработки под высоким давлением благодаря сжатому воздуху. Предполагается, что металлизация защищает данную поверхность от коррозии путем напыления тонкого слоя металла (цинка). Покраска — это последний процесс, который заключается в нанесении последующих слоев краски напылением на окрашиваемую поверхность. Следующим процессом является оснащение установки надлежащими устройствами, установками, системами и т. д. Частично это происходит во время покраски, когда конструкция все еще находится на причале, а остальное — после спуска на воду.

Далее баржа проходит окончательное испытание корпуса на герметичность и проверяются все его устройства и системы. Если все пройдет успешно, контракт будет окончательно сдан в эксплуатацию в присутствии ответственного лица.

### Составление карты производственного процесса

На основе проведенного анализа процессов, происходящих на предприятии, была составлена

карта логистического процесса, используемого при производстве баржи (рис. 2).

На основе подготовленной карты процесса производства барж предлагаются три вида улучшений:

- 1) технологические усовершенствования;
- 2) организационные улучшения;
- 3) альтернативный процесс, объединяющий оба вышеупомянутых подхода, карта которого пред-

ставлена на рис. 3.

Технологическое совершенствование направлено на изменения, которые способствовали бы повышению эффективности производства. Большинство машин, используемых в базовом технологическом процессе, можно заменить станками с ЧПУ. Внедрение таких устройств должно сократить продолжительность определенных производственных операций и улучшить их качество.

Применение автоматизированных машин — это долгосрочная инвестиция, которая окупается. Это также позволяет ускорить все производство, благодаря чему на производственном предприятии может приниматься больше заказов для реализации [8]. К сожалению, такая инвестиция является довольно дорогостоящей, но она увеличит прибыль компании в будущем. Внедрение станков с ЧПУ в производственный процесс позволяет быстрее изменять заданные параметры обработки элементов. Такие машины могут запоминать введенные настройки, что позволяет быстро изменять их без необходимости переопределения.

Другая форма совершенствования влечет за собой организационные изменения производства. Это предполагает реализацию метода «точно в срок» [9]. Рекомендуемые изменения также заключаются в ликвидации центрального склада снабжения и межблочного склада для операций резки. Еще одним рекомендуемым изменением является сокращение количества операций по оснащению баржи с двух до одной, которые могут быть выполнены непосредственно после спуска баржи на воду. Для этого все необходимые элементы оборудования и т. д. будут собраны в одном месте, что позволит улучшить организацию работы.

Третье усовершенствование (рис. 3) включает в себя интеграцию технологических

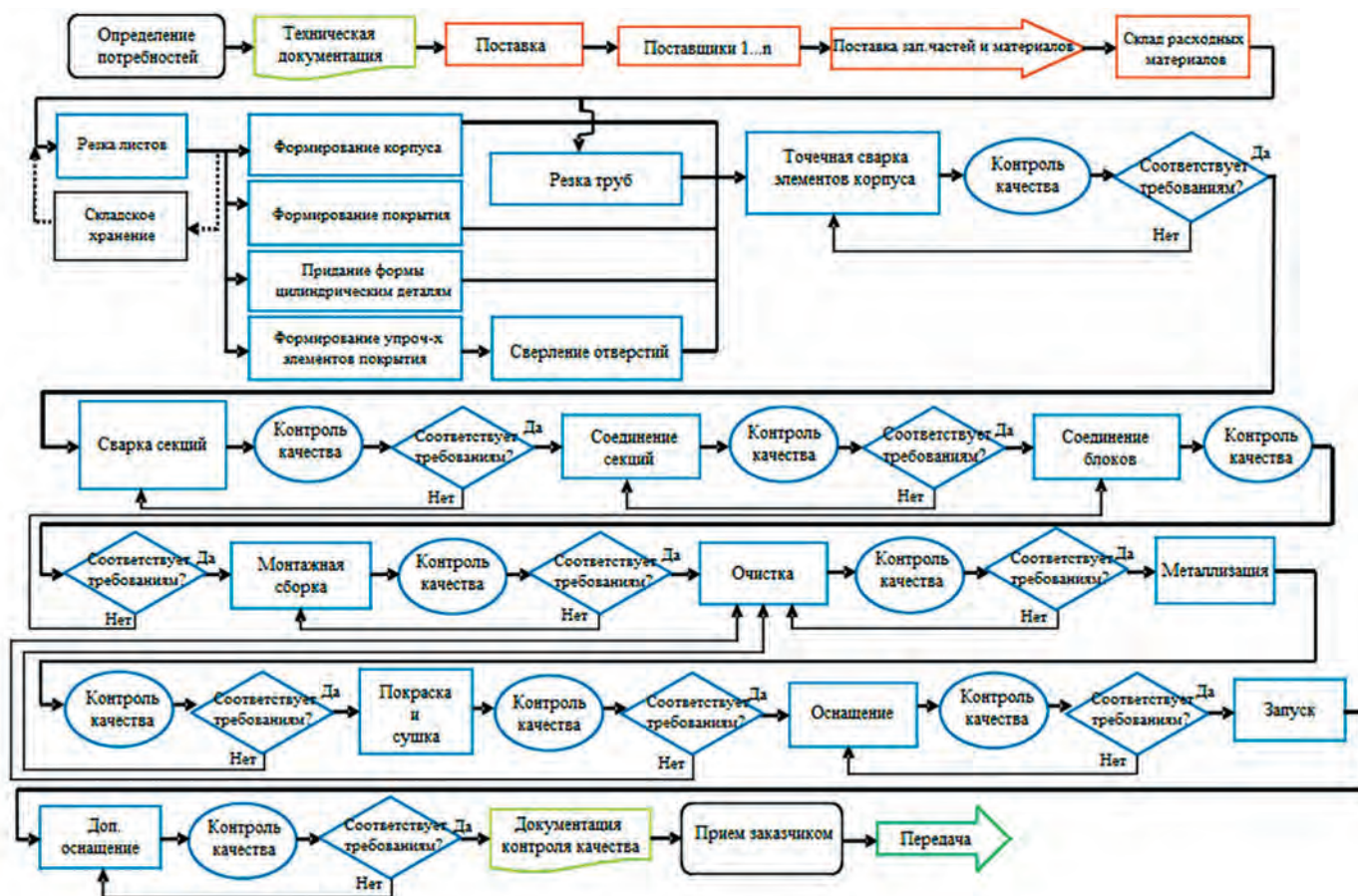


Рис. 2. Карта производственного процесса (состояние до улучшения)

и организационных улучшений, которые должны привести к наибольшему сокращению времени завершения процесса производства одной баржи.

### Сравнительный анализ разработанных улучшений в ПО AnyLogic

Был проведен сравнительный анализ с целью определения возможных преимуществ внедрения процесса улучшения. Инструментом, который использовался для этой цели, была программа для компьютерного моделирования и симуляции процессов под названием AnyLogic.

Данное программное обеспечение является единственным инструментом моделирования, который поддерживает все наиболее распространенные существующие на сегодняшний день методологии моделирования: системную динамику, процессно-ориентированное (дискретное событие) и агентно-ориентированное моделирование [10].

На рис. 4 представлена модель базового (до улучшений) процесса производства барж, разработанная с использованием программного обеспечения AnyLogic.

Модель использовалась для проведения имитационного моделирования процесса производства серии из 50 барж. Результаты моделирования, полученные для производственного процесса до внедрения улучшений, показали, что время изготовления одной баржи составило в среднем ~880 часов.

Было замечено, что 70 % произведенных барж были изготовлены в течение 800–850 часов. Однако для оставшихся 30 % барж потребовалось больше времени для постройки (максимальное время изготовления составило ~1295 часов, минимальное — ~812 часов). Это означает, что некоторые изделия не прошли контроль качества с первого раза и потребовались исправления, что значительно увеличило продолжительность производства.

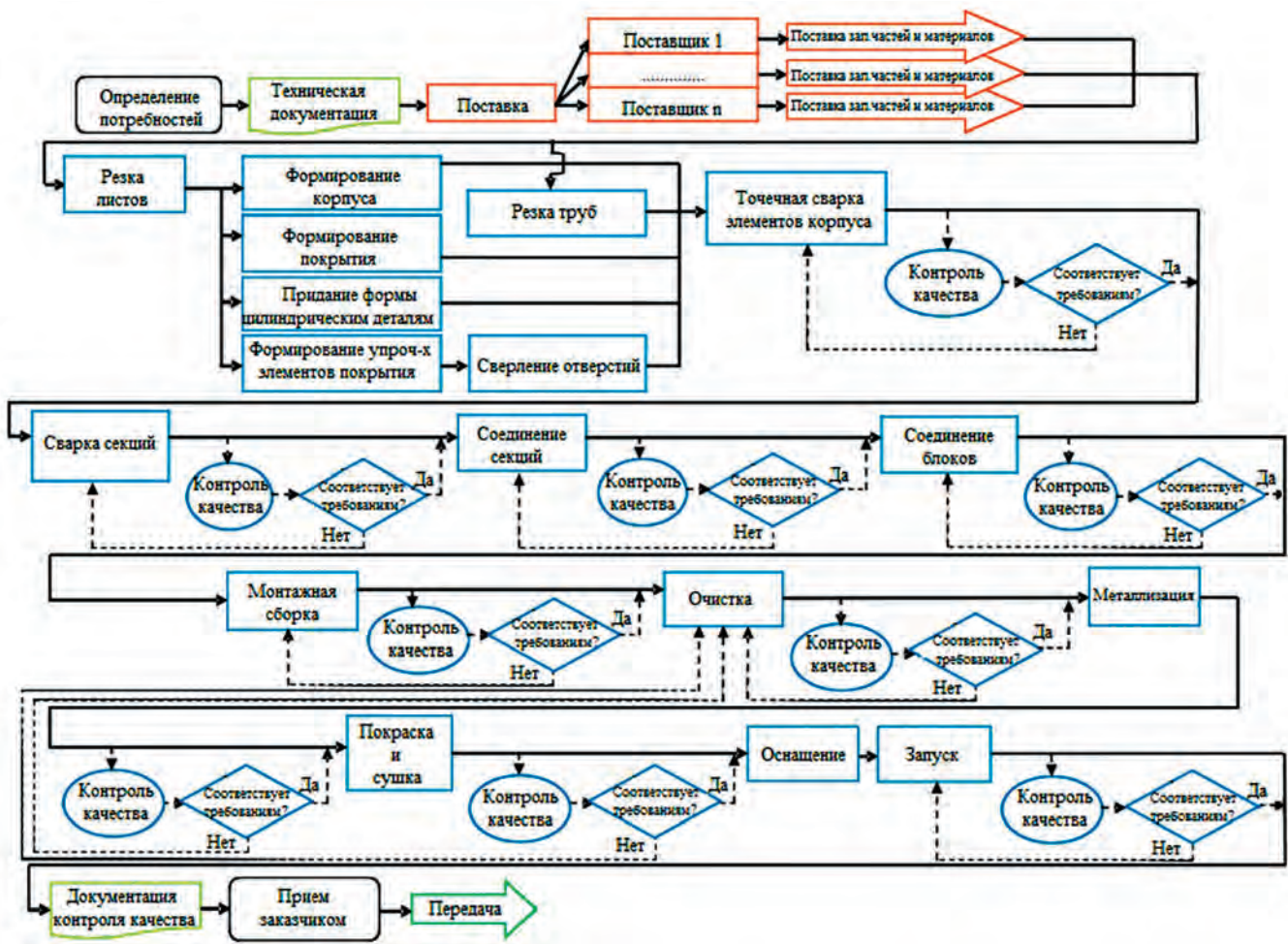


Рис. 3. Карта производственного процесса с технологическими и организационными улучшениями

В случае технологического усовершенствования процесс производства одной баржи длился в среднем  $\sim 805$  часов, что означает, что он был на  $\sim 8,5\%$  короче, чем базовый процесс. Целых  $78\%$  работ было произведено за  $750\text{--}800$  часов. Самое длительное время производства баржи составило  $\sim 1017$  часов, а самое короткое —  $\sim 679$  часов. В результате этого улучшения временной диапазон более ограничен.

Второе улучшение повлекло за собой применение метода «точно в срок». Это позволило ликвидировать склады, сократить количество операций по оснащению до одной, использовать выборочный контроль качества каждого второго или третьего элемента в зависимости от операции. Кроме того, качество продукции было увеличено с  $95$  до  $99\%$ . Благодаря этим изменениям производственный процесс для одной баржи длился в среднем  $\sim 808$  часов. По сравне-

нию с базовым процессом он на  $\sim 8,2\%$  короче. В этом случае большая часть барж ( $32\%$ ) была изготовлена в течение  $800\text{--}810$  часов. Остальные баржи были изготовлены в более короткие или более продолжительные сроки. Самое продолжительное время производства баржи составило  $\sim 829$  часов, в то время как самое короткое —  $\sim 774$  часа.

Вышеупомянутые типы модернизации сократили время изготовления одной баржи в среднем до  $\sim 760$  часов. По сравнению с базовым процессом он на  $\sim 13,5\%$  короче. Моделирование показало, что  $22\%$  барж были изготовлены за  $765\text{--}770$  часов. Самое продолжительное время производства баржи составило  $\sim 777$  часов, в то время как самое короткое —  $\sim 737$  часов.

Таким образом, исходя из вышеперечисленных показателей можно сделать вывод, что наибольшая разница между минимальным и максимальным

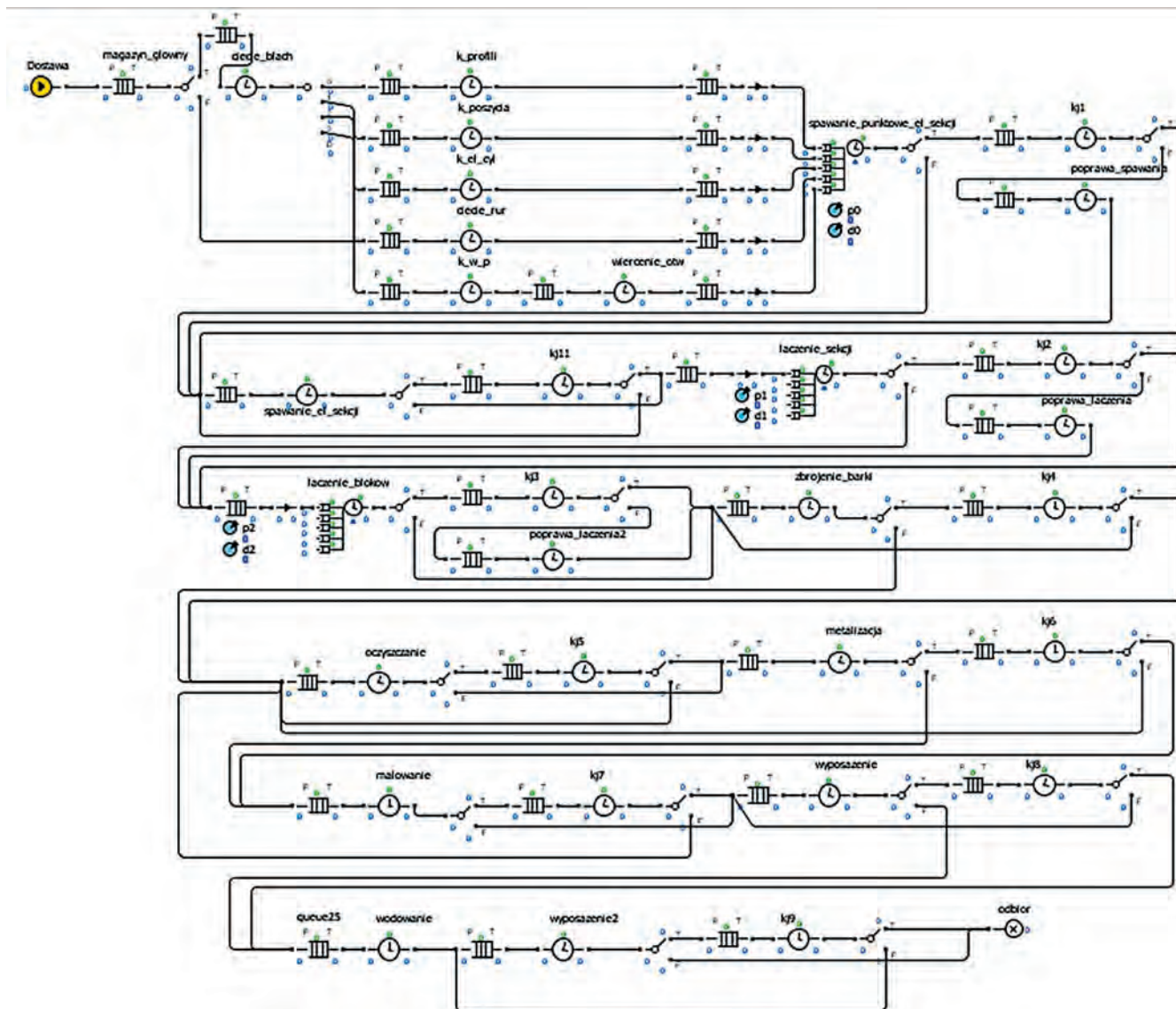


Рис. 4. Модель производственного процесса постройки баржи (состояние до улучшения), составленная в ПО AnyLogic

временем была получена в случае базового процесса и первого улучшения. Это результат проведения контроля качества после большинства операций в этих процессах. Как в случае применения выборочного контроля качества, так и во время второго и третьего улучшений время изготовления баржи сокращается.

## Заклучение

Строительство судна — это сложный и многокомпонентный процесс, требующий тщательного планирования, проектирования и реализации. Картография процесса постройки судов играет ключевую роль в обеспечении эффективности, безопасности и качества каждого этапа производства.

Применение имитационного моделирования процессов постройки судна позволяет судостроительным предприятиям повысить эффективность производственной логистики, сократить временные и финансовые затраты, улучшить качество производимой продукции и повысить конкурентоспособность на рынке. Таким образом, имитационное моделирование является эффективным инструментом для оптимизации процессов в судостроительной отрасли и их дальнейшего развития [11].

Данная работа показала, что составление карты производственного процесса с использованием ПО AnyLogic позволяет представить процесс так же, как в методе составления карты, но при этом

провести параметрический анализ потоков и зависимостей между заданными этапами процесса. В результате проведенного имитационного моделирования были сделаны следующие выводы:

- внедрение технологического усовершенствования процесса производства барж может сократить время их изготовления на 75 часов (что составляет 8,5 % от общего времени производства);

- внедрение в процесс производства баржи организационных улучшений может сократить время ее изготовления на 72 часа (что составляет 8,2 % от общего времени производства);

- объединение обоих этих усовершенствований в одно позволяет сократить время производства на 120 часов (что составляет 13,5 % от общего времени изготовления) и соответствует 15 рабочим дням.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савченко О. В., Половинкин В. Н. Современное состояние, проблемы и перспективы развития отечественного гражданского судостроения // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Т. 3, № 401. С. 152–164. DOI: 10.24937/2542–2324-2022-3-401-152-164
2. Акопов А. С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017. 389 с.
3. Langford J. W. Logistics: Principles and Applications. Second Edition. New York: McGraw Hill, 2007. 578 p.
4. Conger S. A. Process Mapping and Management. New York: Business Expert Press, 2011. 488 p.
5. Evolving Toolbox for Complex Project Management / A. Gorod [et al.] (eds.). Boca Raton (FL): CRC Press, 2019. 544 p.
6. Качанов И. В. Проектирование судов: пособие по курсовому и дипломному проектированию: в 3 ч. Ч. 1. Минск: Белорусский национальный технический ун-т, 2017. 60 с.
7. Народецкий Я. З. Технология постройки барж. М.: Речной транспорт, 1956. 26 с.
8. Лимановская О. В. Имитационное моделирование в AnyLogic 7: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 1. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2017. 152 с.
9. Just-in-Time Systems / R. Z. Ríos-Mercado, Y. A. Ríos-Solís (eds.). New York: Springer New York, 2011. 320 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-1123-9
10. AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions for Business. URL: <http://www.anylogic.com> (assessed: 29.03.2024).
11. Darwish A. Business Process Mapping: A Guide to Best Practice. Patterson Lakes: Writescope Publishers, 2011. 238 p.

Дата поступления: 11.06.2024

Решение о публикации: 17.07.2024

## Application of Simulation Modeling in Ship Construction Processes

**Sergey S. Sokolov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Integrated Information Security. E-mail: sokolovss@gumrf.ru

**Alyona E. Antonova** — Graduate student of the Department of Integrated Information Security. Research interests: automation of production processes, simulation modeling. E-mail: antonovaae@gumrf.ru

Admiral Makarov State University of Marine and River Fleet, 5/7 Dvinskaya str., St. Petersburg, 198035, Russia

**For citation:** Sokolov S. S., Antonova A. E. Application of Simulation Modeling in Ship Construction Processes // Intellectual Technologies on Transport. 2024. No. 3 (39). Pp. 44–51. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-44-51. (In Russian)

**Abstract.** *This article provides an example of the application of the method of simulation modeling of ship construction processes in AnyLogic software. The process is briefly described and the logistics of building a barge produced at shipyards is characterized, and a map of the production process is prepared. In conclusion, three possible modernization options were proposed, which consist in technological, organizational improvements and a variant combining both of these solutions. AnyLogic software was used for a comparative analysis of the proposed options in relation to the process in the basic version. This method allows you to obtain accurate data for making informed decisions without the need for physical tests. The use of simulation modeling is a key tool for optimizing shipbuilding processes and further development of the industry.*

**Keywords:** *simulation modeling, mapping of processes, process improvements, shipbuilding industry*

## REFERENCES

1. Savchenko O. V., Polovinkin V. N. Sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otechestvennogo grazhdanskogo sudostroeniya // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2022. T. 3, № 401. S. 152–164. DOI: 10.24937/2542–2324-2022-3-401-152-164 (In Russian)
2. Akopov A. S. Imitacionnoe modelirovanie: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata. M.: Yurajt, 2017. 389 s. (In Russian)
3. Langford J. W. Logistics: Principles and Applications. Second Edition. New York: McGraw Hill, 2007. 578 p.
4. Conger S. A. Process Mapping and Management. New York: Business Expert Press, 2011. 488 p.
5. Evolving Toolbox for Complex Project Management / A. Gorod [et al.] (eds.). Boca Raton (FL): CRC Press, 2019. 544 p.
6. Kachanov I. V. Proektirovanie sudov: posobie po kursovomu i diplomnomu proektirovaniyu: v 3 ch. Ch. 1. Minsk: Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij un-t, 2017. 60 s. (In Russian)
7. Narodeckij Ya. Z. Tekhnologiya postrojki barzh. M.: Rechnoj transport, 1956. 26 s. (In Russian)
8. Limanovskaya O. V. Imitacionnoe modelirovanie v AnyLogic 7: uchebnoe posobie: v 2 ch. Ch. 1. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo un-ta, 2017. 152 s. (In Russian)
9. Just-in-Time Systems / R. Z. Ríos-Mercado, Y. A. Ríos-Solís (eds.). New York: Springer New York, 2011. 320 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-1123-9.
10. AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions for Business. URL: <http://www.anylogic.com> (assessed: 29.03.2024).
11. Darwish A. Business Process Mapping: A Guide to Best Practice. Patterson Lakes: Writescop Publishers, 2011. 238 p.

Received: 11.06.2024

Accepted: 17.07.2024