

МОДЕЛЬ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ БОРЬБЫ ЗА ЖИВУЧЕСТЬ КОРАБЛЯ, СУДНА

А.В. Алексеев, В.В. Антипов, А.В. Михальчук, А.В. Смольников
(Санкт-Петербург)

Актуальность

Одним из основных путей обеспечения безопасности мореплавания, одной из прорывных технологий создания и эксплуатации корабельных автоматизированных систем управления (КАСУ), в настоящее время рассматривается **роботизация управления** объектами автоматизации различного назначения [1, 2]. Решение этой весьма сложной научно-практической задачи позволяет кардинальным образом снижать негативное влияние пресловутого «человеческого фактора» (ЧФ) – операторов КАСУ, повышать системное проектное качество и эффективность эксплуатации КАСУ в целом, обеспечивать безопасность эксплуатации, локализации аварийных ситуаций и аварий, эффективность системы борьбы за живучесть технических средств и корабельного оружия (СБЖК) применительно к разнородным объектам автоматизации, а также контролировать результативность реализации управленческих решений.

Другим источником совершенствования КАСУ, СБЖК, получающим сегодня свое развитие в составе подсистем поддержки принятия управленческих решений и роботизации управления, следует считать **упреждающее (проактивное) управление**, суть которого – прогнозирование состояния каждого критического (влияющего на проектное качество/эффективность эксплуатации) элемента корабля/судна, включая эргатические, и принятие решений в упреждающий на N циклов управления момент времени в сравнении с текущим моментом времени.

Только эти два отличительных признака обеспечивают новый уровень качества главного свойства КАСУ – оперативность (своевременность) управления. Вместе с тем переход к проактивному управлению приводит, как можно показать, к росту также устойчивости, скрытности и непрерывности управления, что подтверждает перспективность перехода к принципу и технологии проактивного управления.

Создание **роботизированных систем проактивного управления технологическими процессами** (РСПУ ТП) корабля/судна и внедрение подобных интегрированных КАСУ позволяет более чем вдвое сокращать численность экипажа, организовав управление судном на типовых (штатных) ходовых режимах практически одним оператором [3] и, главное, предотвращать угрозы аварийных ситуаций [1–3].

При расширении числа контуров автоматизации проактивного управления, их проектного качества и эффективности (как меры реализации проектного качества) соответственно обеспечивается безопасность плавания, эксплуатации и живучести технических систем, включая экологическую безопасность. Это достигается за счет роботизации режимов маневрирования, расхождения судов, автоматического выбора оптимальных параметров и маршрутов, режимов движения судна, оптимизации параметров КАСУ, использования технологического оборудования с учетом параметров среды, объектов автоматизации в целом.

Постановка задачи

Круг задач, решаемых РСПУ ТП судна, чрезвычайно широк и разнообразен. Состав конкретной РСПУ ТП определяется прежде всего регистровым классом, типом и целевым назначением судна, классом его автоматизации, специальными требованиями заказчика к КАСУ, необходимостью соответствия требованиям определенных классификационных обществ и международных морских конвенций.

Эта тенденция порождает качественно новую проблему организационной и технологической сложности объектов автоматизации, включая КАСУ, генеральное направление решения которой, по мнению специалистов, сегодня лежит исключительно в пространстве **роботизации проактивного управления**.

Поэтому среди круга других актуальных рассмотрим отдельно конкретную **задачу** создания, описания, использования компьютерной модели и соответствующей технологии проактивного управления процессами борьбы за живучесть корабля, судна.

Методы решения

Одним из привлекательных в этом контексте направлений развития технологий и РСПУ ТП является создание модели на базе технологии так называемых **«цифровых двойников/близнецов»** (ЦД, Digital Twin), под которыми [4] понимаются цифровые (виртуальные) интерактивные модели («копии») объекта автоматизации и соответствующих процессов, синхронизированные с ними и позволяющие оптимизировать параметры, характеристики, качество и эффективность объекта автоматизации, предсказывать результаты их функционирования, обеспечивать качество в целом, а также обнаруживать проблемы функционирования и решать их.

Неизбежное расширение комплекса названных методов решения поставленной задачи обусловлено актуальностью и перспективностью интеллектуализации поддержки принятия решений оператором-исследователем за счет перехода к полимодельному представлению исследуемых объектов, квалиметрическому методу системного анализа, синтеза и параметрической их оптимизации.

Цель исследования

В этом контексте представляется актуальным формирование концепции, модели и технологического образца ЦД типовой РСПУ ТП судна (**предмет исследования**) в составе ЦД сложного организационно-технического объекта – КАСУ и судна в целом (объект исследования), а также ЦД группы судов (корабельной группы), ЦД верфи, ЦД порта и т.п. на примере решения задач СБЖК.

Новизна предлагаемого подхода и данного организационно-технологического предложения обусловлена принятой парадигмой цифровизации, квалиметрического анализа и оптимизации системных свойств и характеристик перспективных технологий и соответствующих компьютерных средств (в перспективе – их сертификации), а также разработки и реализации, включая средства моделирования, в том числе по технологии цифровых двойников РСУ ТОУ с элементами искусственного интеллекта.

Материалы, модель, методы и технология решения задач, принятые допущения

Структурно состав РСПУ ТП судна может быть представлен в виде архитектуры (структурной модели), изображенной на рис. 1 [5], в которую наряду с традиционными подсистемами типовой автоматизированной системы управления судна [6] включены обеспечивающие решение задач подсистемы ЦД РСПУ ТП с соответствующими дополняющими элементами ЦД КАСУ в составе 9 подсистем [7–11].

Введение впервые [8] в состав типовой КАСУ судна системы цифрового паспорта на базе реализации технологии квалитетического анализа, синтеза и оптимизации решений (КАСОР), системы интеллектуальной поддержки решений и управления (СПРУ) типа [9], системы цифрового мониторинга, прогнозирования и контроля (ЦМПК) типа [10] и системы управления базой данных и знаний (СУБДЗ) в составе ЦД типа [11] привело к развитию парадигмы управления и переходу от функций и административно-диспетчерских задач к функциям роботизированного проактивного наблюдения и управления с решением задач целеполагания.

Это создает новые условия для повышения качества управления СБЖК вследствие:

- минимизации избыточного числа циклов принятия решений операторами за счет перехода к анализу, в первую очередь, системных (агрегированных) показателей;
- минимизации числа возможных ошибок и неэффективных решений за счет минимизации числа циклов принятия решений и мониторинга их качества;
- перехода к роботизированному (автоматическому) проактивному принятию решений с предупреждением аварийных ситуаций и аварий за счет интеллектуализации и обязательной генерации проектов управленческих решений;
- реализации и цифрового контроля (использованию) субоптимальных (рациональных) и оптимальных управленческих решений за счет их системного анализа по гармоническому алгоритму квалитетического анализа.

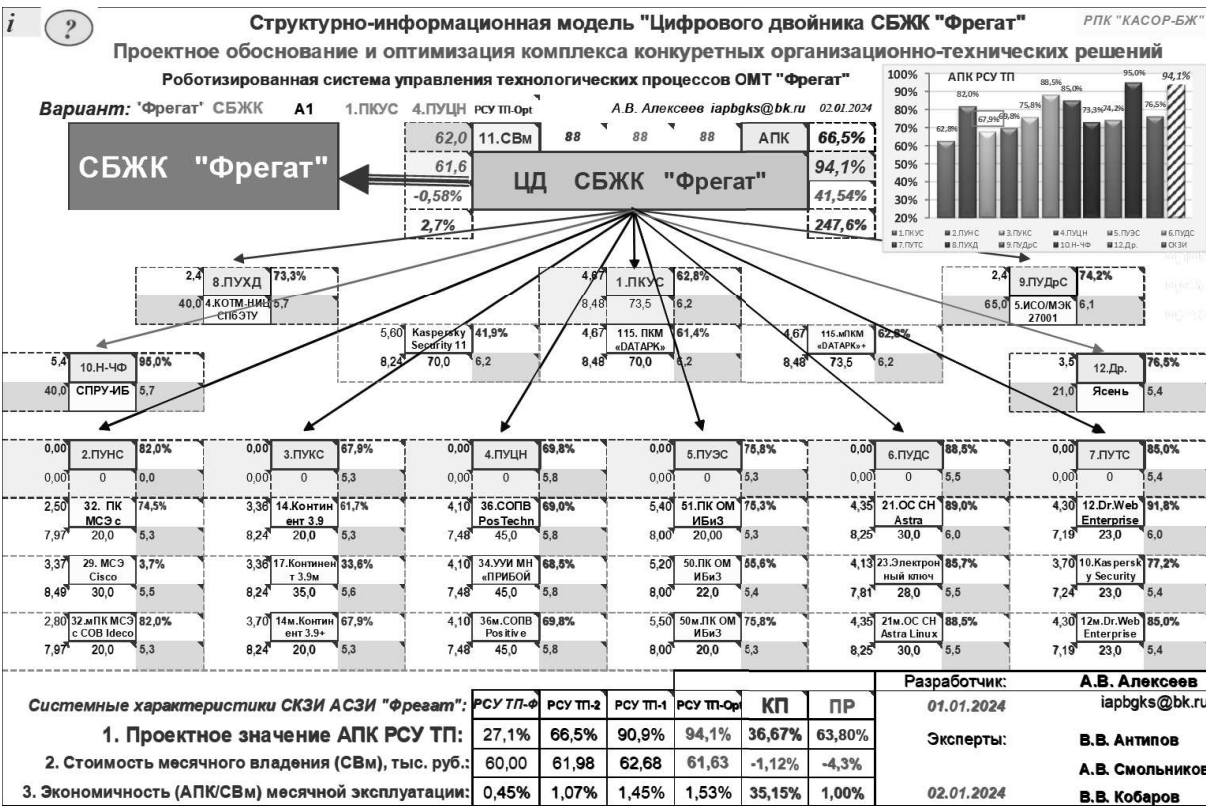


Рис. 1. Главная экранная форма технологического образца РПК «КАСОР-БЖ» в режиме «Цифровой паспорт»

Практическими примерами названных подсистем в составе РСПУ ТП корабля/судна могут выступать прежде всего автоматизированные и интеллектуальные системы поддержки принятия решений типа [12-14], а также интегрированные СПРУ типа [9], в том числе на базе модели и технологий инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники [7].

При создании ЦД с обработкой больших массивов данных оптимизация вариантов визуализации в интересах повышения качества управления имеет первостепенное значение, особенно по критерию максимизации системного (агрегированного) показателя качества РСПУ ТП судна.

На рис. 1 в порядке апробации разработанной модели и реализующей ее технологии ЦД СБЖК в развитие [13, 14] приведен вариант модели и интерфейсная форма макетно-действующего образца роботизированного проектного комплекса (РПК) «КАСОР-БЖ». При этом задача проактивного управления (алгоритм) состоянием корабля/судна сводится к реализации следующего алгоритма:

1. Сбор и нормализация данных с датчиков контроля, число которых на судне составляет сегодня, как известно, порядка 2500, а на корабле – порядка 3500, что позволяет достаточно объективно отражать состояние и динамику ситуационного развития корабля/судна на всех режимах функционирования, включая процессы и управление борьбой за живучесть корабля, судна.

2. Полимодельное агрегирование ЧПК по типу [4, 5], рис. 2, в групповые показатели качества (ГПК) объектов исследовательского проектирования (ОИП), отражающих свойства корабля/судна. Например, для тактических свойств подводных лодок: **сильные свойства** – скрытность (определяется ЧПК – глубина погружения, уровень физических полей, подводная мореходность, тактические приемы и т.п.); автономность (дальность плавания, автономность по запасам и т.п.); вооруженность; многозадачность; подледность; **слабые свойства** – ограниченная скрытность связи; ограниченная противовоздушная защищенность; скорость отрыва от противолодочных сил; физическая заметность и т.п.

3. Полимодельного агрегирования ГПК по типу [4, 5] в модельные показатели качества (МПК) каждого ОИП с целью снижения погрешностей моделирования, в комплексные показатели качества (КПК) для каждого ОИП в целом, а далее в агрегированный системный показатель качества (АСПК) для системы (группы) объектов моделирования, в модельный системный показатель качества (МСПК) и в полимодельный системный показатель качества (единый агрегированный показатель качества) для системы ОИП (ПСПК) с производными показателями военно-технологического превосходства (ВТП)/конкурентной способности (КС) корабля/судна.

4. Мониторинг всего множества ЧПК, ГПК, МПК, КПК (для каждого корабля/судна), а также АСПК, МСПК, ПСПК (для системы/группы кораблей/судов) и объектов морской инфраструктуры (береговых пунктов управления, обеспечения и т.п.) для обеспечения возможности системного учета и анализа факторов эффективности.

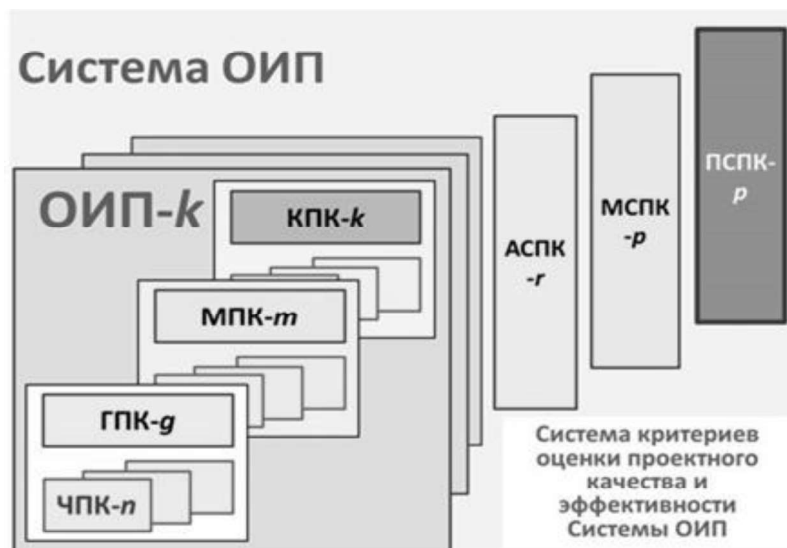


Рис. 2. Схема формирования системы показателей качества ОИП

5. Параллельный по всем каналам контроль регрессионного анализа названного выше массива данных с адаптивным выбором аппроксимирующих функций по критерию минимума погрешности аппроксимации по типу [5, 7].

6. Автоматический 4-уровневый мониторинг и контроль соответствия состояния корабля/судна заданным нормативным требованиям в диапазоне значений, например, [0; 50] с соответствующей сигнализацией и визуализацией результатов, как показано, например, на рис. 3 [8, 9], по схеме: заданным требованиям соответствует (например, с границами (40; 50]); угроза невыполнения заданных требований (35; 40]; невыполнение заданных требований (20; 35]; угроза потери управления [0; 20].

Приведенные данные мониторинга наглядно и конкретно показывают, что еще на реальный момент времени 3:41 явных угроз безопасности в канале «АПК» не наблюдается. Но уже на упреждающий момент времени 3:49 возникает «Угроза невыполнения требований по АПК», а в момент времени 3:55 (упреждение – 6 мин) ожидается состояние объекта информатизации «Невыполнение заданных требований» (14 мин), что требует соответствующих проактивных мер противодействия.

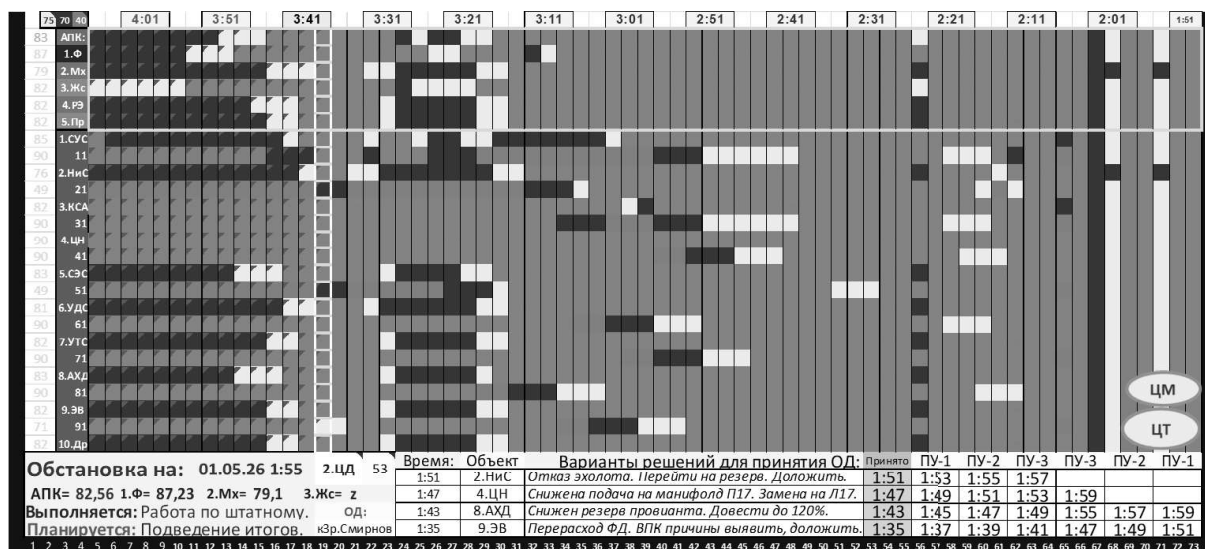


Рис. 3. Пример реализации задачи проактивного управления на базе РПК «КСР-26»

При этом в интересах минимизации информационной избыточности предусматривается два режима актуализации данных в базе данных и знаний (БДЗ): традиционный циклический – с синхронной записью данных; асинхронный – с записью системных данных только при их изменении по данным п. 6.

7. Автоматический проактивный (упреждающий) синтез управленческих решений с их визуализацией оператору для принятия решений и их регистрации в соответствии с ситуационными данными тактической и эрготехнической обстановки.

8. Автоматическое доведение до постов управления и исполнителей принятых решений и соответствующих регламентированных указаний из БДЗ, в которой содержатся и непрерывно актуализируются с учетом анализируемого и накапливаемого лучшего опыта «деревья» сценариев развития обстановки, предпочтительные решения и соответствующие им инструктивные указания экипажу.

9. Автоматический анализ изменения обстановки по результатам реализации принятых решений, доклада исполнителей (квотирования выполнения регламентированных действий с возможностью их уточнения и корректировки) с оценкой и контролем эффективности управления по критерию, впервые предложенному в [4], доли реализованных решений к их общему числу, включая нереализованные, отмененные и скорректированные решения.

10. Анализа трендов эффективности управления для сводных отчетов по качеству функционирования систем управления кораблем/судном и их развития.

Анализ результатов

Разработанная модель и технология ЦД СБЖК на базе результатов исследований [1-14] обеспечивает наряду с представленными данными мониторинга системных показателей качества РСПУ ТП СБЖК также автоматический сравнительный выбор состава средств КАСУ из альтернативного ряда применительно к задачам ЦД по критерию максимума агрегированного показателя качества СБЖК, а также с использованием автоматически оцениваемых индексов корневой чувствительности – обоснование направлений параметрической их оптимизации.

Использование приведенной технологии и РПК «КАСОР» в варианте ЦД СБЖК, как показала практика моделирования, позволяет непрерывно и в реальном масштабе времени оценивать, наблюдать, анализировать, контролировать и оптимизировать структуру и наиболее значимые (системные) показатели обстановки с учетом условий функционирования СБЖК, прогнозировать ее развитие и принимать упреждающие автоматизированные решения по управлению качеством и эффективностью КАСУ, контролировать их результативность с выигрышем по упреждению порядка 15 минут.

Выводы

В качестве одного из перспективных направлений развития технологий цифровых двойников СБЖК, обеспечения их конкурентной способности и перспективности развития целесообразно считать предлагаемую модель и технологию роботизации управления КАСУ различного назначения на основе создания **цифровых двойников проактивного управления** с использованием, например, в качестве системообразующих средств ЦД – модель и технологию РСУ ТП судна типа РПК «КАСОР-БЖ», впервые представленную в [8, 14].

Среди альтернативных вариантов основным преимущественным отличием данного предложения является высокая ценность и минимизация объема (информационной избыточности) представляемых оператору данных в реальном масштабе времени с цифровизацией их качества и прогнозированием динамики развития, проактивным управлением и контролем качества управления, системно и эффективно отражающих состояние и эволюцию объекта информатизации в целом.

Новизна полученных результатов обусловлена впервые представленным алгоритмом проактивного управления на базе оценки и анализа системных показателей качества (показателей мета-уровня), а также отмеченной уникальной особенностью технологического решения ЦД РСУ на базе РПК «КАСОР».

Следует также считать весьма перспективной возможность цифрового обоснования направлений развития исследуемых вариантов ОМТиМТС путем автоматической оценки, анализа и использования системных показателей качества мета-уровня, индексов их корневой чувствительности, как показано на рис. 1 и 3.

Литература

1. **Бобрович В.Ю., Алексеев А.В., Антипов В.В., Смольников А.В.** Комплексное моделирование системного управления качеством и конкурентной способностью морской техники // Шестая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2021). Труды конференции. – М.: Перо, 2021. С. 26–32.
2. **Согонов С.А., Алексеев А.В., Максимова М.А., Равин А.А., Хруцкий О.В.** Прорывные технологии морских автоматизированных систем в защищенном исполнении // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы Одиннадцатой международной научно технической конференции. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2022. С. 69-77.
3. **Бобрович В.Ю., Алексеев А.В., Антипов В.В., Мусатенко Р.И., Смольников А.В.** Системное управление проектным качеством и живучестью объектов морской техники: теория практики // Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем (ИКМ МТМТС-2023)». Труды конференции. СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. С. 48-56.
4. **Алексеев А.В., Максимова М.А., Михальчук А.В., Согонов С.А.** Модель и технология цифровых двойников систем автоматизации судов // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ). 2023. Вып. 4 (8). С. 5-14.
5. **Алексеев А.В.** Теория практики цифровых двойников в судостроении // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности / Под науч. ред. В.В. Девяткова. – Казань: Изд-во АН РТ, 2023. С. 78-90.
6. **Московцев Ю.П.** Принципы создания АСУ ТП гражданских судов // Системы управления и обработки информации: Научно-технический сборник / ФНПЦ «НПО «Аврора», СПб., 2000. Вып. 1.
7. **Алексеев А.В.** Модель инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники // Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies, № 2. Том 2, 2020. С. 53-60.
8. **Алексеев А.В.** Программа квалитетического анализа, синтеза и оптимизации решений (КАСОР) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023616388, 27.03.2023.
9. **Алексеев А.В.** Программный комплекс системной поддержки принятия решений и управления (СПРУ) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023616019, 21.03.2023.

10. **Алексеев А.В., Михальчук А.В.** Цифровой мониторинг, прогнозирование и контроль успешности реализации комплекса организационно-технических решений (ЦМПК) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023661669, 01.06.2023.
11. **Алексеев А.В., Михальчук А.В.** Цифровой двойник системы комплексной защиты информации в инвариантном исполнении (ЦД СКЗИ) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023662162, 06.06.2023.
12. Автоматизация процессов борьбы за живучесть корабля, судна // Коллективная монография / Под ред. К.Ю. Шилова. – Санкт-Петербург: ИАП БЖКС, эл. интерактивное изд. (третье), испр. и доп., с приложением, 2022. – 506 с.
13. **Михальчук А.В., Алексеев А.В., Антипов В.В., Смольников А.В.** Алгоритм функционирования цифрового двойника управления борьбой за информационную живучесть корабля, судна в режиме «Цифровой тени» // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Вып.14 / СПОИСУ. – СПб., 2025. С. 399-404.
14. **Алексеев А.В., Согонов С.А., Антипов В.В., Смольников А.В.** Технология оптимизации проектных решений по критерию обеспечения конкурентной способности продукции и услуг // Новые технологии в судостроении. НТС-2025: Сборник трудов отраслевой научно-технической конференции / АО «ЦТСС», 2025. С. 20–29.