

Научная статья

УДК 620.3+533.59+621.793

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/3-14>

Автоматизация процесса легирования силицидосодержащих образцов

Дмитрий Владимирович Фомин, Илья Александрович Рябов✉

Илья Олегович Шолыгин, Алексей Вячеславович Поляков

Амурский государственный университет,

Благовещенск, Российская Федерация

✉ rybovilay@gmail.com

Аннотация. В работе представлен результат автоматизации процесса легирования силицидосодержащих образцов на основе разработанного прототипа устройства, которое позволяет осуществлять ступенчатое легирование, а также выполнять точное позиционирование масок относительно образца и их смену в зависимости от скорости сублимации легирующей добавки из резистивного испарителя. Разработка прототипа проведена исходя из модернизации ранее изготовленного лабораторного образца устройства (заявка Роспатент № 2024135444 от 27.11.2024). К элементам модернизации относятся: изменение геометрии и расположения резистивного испарителя, а также способ передачи вращения от ведущего вала к валу каретки с масками.

Ключевые слова: вакуумные системы, полупроводники, резистивный испаритель, легирование, прецизионные маски

Для цитирования: Фомин Д.В., Рябов И.А., Шолыгин И.О., Поляков А.В. Автоматизация процесса легирования силицидосодержащих образцов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 3–17.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта АмГУ на 2024–2025 год.

MECHANICS OF DEFORMABLE SOLIDS

Original article

Automation of the doping process of silicide-containing samples

Dmitry V. Fomin, Ilya A. Ryabov✉, Ilya O. Sholygin, Alexey V. Polyakov

Amur State University,

Blagoveshchensk, Russian Federation

✉ rybovilay@gmail.com

Abstract. The paper presents the result of automating the process of alloying silicide-containing samples based on a developed prototype device that allows for stepwise alloying, as well as performing precise positioning of masks relative to the sample and changing them depending on the rate of sublimation of the alloying additive from a resistive evaporator. The prototype was developed based on the modernization of a previously manufactured laboratory sample of the device (Rospatent application No. 2024135444 dated 11.27.2024). The modernization elements include: changing the geometry and location of the resistive evaporator, as well as the method of transferring rotation from the drive shaft to the shaft of the carriage with masks.

Keywords: vacuum systems, semiconductors, resistive evaporator, alloying, precision masks

For citation: Fomin D.V., Ryabov I.A., Sholygin I.O., Polyakov A.V. Automation of the doping process of silicide-containing samples. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 3–14. (In Russ.).

Foundation: AmSU internal grant for 2024–2025.

Введение

Технологии производства полупроводниковых приборов базируются на процессах фотолитографии, травлении, диффузии, напылении тонких плёнок. Во многих из них часто используется маскирование. Так, в фотолитографии используют фотошаблоны при экспонировании фоторезиста, для получения определённой топологии рельефа фоторезиста на полупроводнике. Маскирование может также использоваться при формировании на полупроводниковых приборах тонких плёнок, контактных площадок, резистивных или диэлектрических слоёв, что позволяет получить планарные транзисторы, тонкоплёночные резисторы, конденсаторы и др. [1–5].

В процессе формирования полупроводниковых приборов важную роль играет также легирование полупроводников, то есть добавление в состав материала легирующих примесей. Это делается для изменения типа носителей заряда и концентрации их в полупроводнике, а также для создания плавного р-n перехода. Существует два основных метода осуществления легирования: ионная имплантация и термодиффузия [3–26].

Ионная имплантация, или ионное легирование, заключается во внедрении легирующей примеси бомбардировкой примесных атомов, представляющих собой ионы с энергиями порядка десятков кэВ. Глубина их проникновения составляет до одного микрона. Возможен процесс разрушения структуры кристалла при данных энергиях ионов, однако процесс является обратимым, для этого проводится термический отжиг. Одними из важнейших преимуществ такого метода являются точный контроль над количеством осаждаемой примеси, а также возможность точного нанесения на определённую область полупроводника. А недостатком является высокая стоимость оборудования для реализации данного метода [6, 7, 9–15].

Метод термодиффузионного легирования основан на попадании в полупроводник легирующей примеси в результате диффузии её из газовой фазы [1, 3–5, 16–26]. На поверхности атомы примеси взаимодействуют с атомами полупроводника и диффундируют в приповерхностные слои, образуя твёрдый раствор замещения. Процесс возможен при наличии в полупроводнике точечных дефектов, а именно вакансий. Во многом процесс зависит от температуры полупроводника: чем выше температура, тем выше коэффициент диффузии, вследствие этого растёт частота диффузионных перескоков атомов. Для предотвращения диффузии окружающей атмосферы процесс диффузии проводят под вакуумом. В данном методе используются маски для осуществления легирования определённой области полупроводника или создание ступенчатого профиля легирования (создание градиента концентрации легирующей примеси). Важную роль при использовании маскирования занимает расстояние от полупроводника до масок для более чётких границ области осаждённой примеси. Основным преимуществом, по сравнению с ранее рассмотренным методом ионной имплантации, является невысокая стоимость оборудования. Недостаток – низкий контроль концентрации напыляемой примеси [6–8].

Анализируя литературные источники [27, 28], можно выделить следующие типы масок:

- 1) маски, представляющие собой слой нанесённого на полупроводник органического или неорганического материала с участками для легирования на этом слое;
- 2) маски, жёстко закреплённые на полупроводнике с отверстиями, выполняющими роль окон для напыления.

Такие варианты масок позволяют наносить точный топографический рисунок. Однако не позволяют создавать сложную топологию, такую как ступенчатую, или градиентную. Для её реализации необходимо совершать замену этих масок в вакууме.

Обзор технических реализаций устройств, позволяющих совершать перемещение, был проведён на основе данных из Роспатента. Так, в источнике [2] описан механизм перемещения образцов в вакуумной камере, осуществляемого ручным приводом, который не позволяет осуществлять точное и своевременное позиционирование. В [29] перемещение осуществляется с помощью шагового двигателя, но в отличие от предыдущего оно происходит в условиях атмосферы. Так, в результате проведённого патентного поиска не было найдено устройств, ана-

логичных предлагаемому в настоящей статье, которые позволяли бы производить смену масок в условиях вакуума.

На основе вышеизложенного были выделены следующие требования к установке для автоматизации процесса легирования силицидосодержащих образцов:

- 1) точное позиционирование масок относительно образца;
- 2) своевременная смена масок в зависимости от скорости испарения осаждаемого материала.

Материалы и методы

Основная задача предлагаемого устройства заключается в перемещении масок в условиях вакуума и осуществлении контроля процесса осаждения различных примесных материалов, например Al, Au, Sb, для нанесения контактов на полупроводниковые материалы на основе силицидов. Осаждение предлагается проводить хорошо зарекомендовавшим себя методом термодиффузии. Реализовать данный метод возможно в том числе с помощью устройства, представленного на рисунке 1.



Рис. 1. Структурная схема устройства для реализации метода термодиффузии со сменой прецизионных масок (из заявки Роспатент № 2024135444 от 27.11.2024)

Fig. 1. Structural scheme of the device for the implementation of the thermal diffusion method with a change of precision masks (from Rospatent application No. 2024135444 dated 11.27.2024)

Устройство работает следующим образом: на персональном компьютере (ПК) пользователем устройства задаётся очередность смены масок и требуемая концентрация напыляемого вещества. Блоком питания осуществляется нагрев резистивного испарителя. Под действием температуры и внешнего давления вакуума твёрдое вещество переходит в жидкую, а затем в газовую фазу или же переходит непосредственно напрямую в газовую фазу. Тепловая энергия придаёт ускорение атомам, вследствие чего те перемещаются из резистивного испарителя в сторону образца и датчика. Попадая на образец, атомы диффундируют в кристаллическую решётку образца. Скорость сублимации регистрируется датчиком, информация от которого передаётся в микроконтроллер. Благодаря программному обеспечению микроконтроллер анализирует полученную информацию и определяет параметры: время экспозиции маски перед образцом и скорость перемещения масок. После чего микроконтроллер подаёт сигнал шаговому двигателю на осуществление перемещения каретки с масками. В случае нестабильности скорости сублимации микроконтроллер посредством программы изменяет параметры

согласно заданию пользователя. По завершении программы процесс легирования образца считается законченным. В случае ошибок, возникших в процессе легирования, на персональный компьютер пользователю приходит уведомление об их наличии.

В предложенном устройстве маски являются легкозаменяемыми, так как выполнены в виде кассеты, помещающейся в держатель. Конфигурация отверстий на масках может быть различна, например, маски, выполненные с постепенным увеличением их ширины, позволяют создавать ступенчатое (градиентное) легирование на образце.

В первом прототипе устройства предлагалось использовать параллельное расположение резистивного испарителя относительно масок и, соответственно, самого силицидосодержащего образца. Также ведущий вал был расположен соосно с валом каретки и соединён с ним муфтой. 3D-модель первоначального вида устройства представлена на рисунке 2.

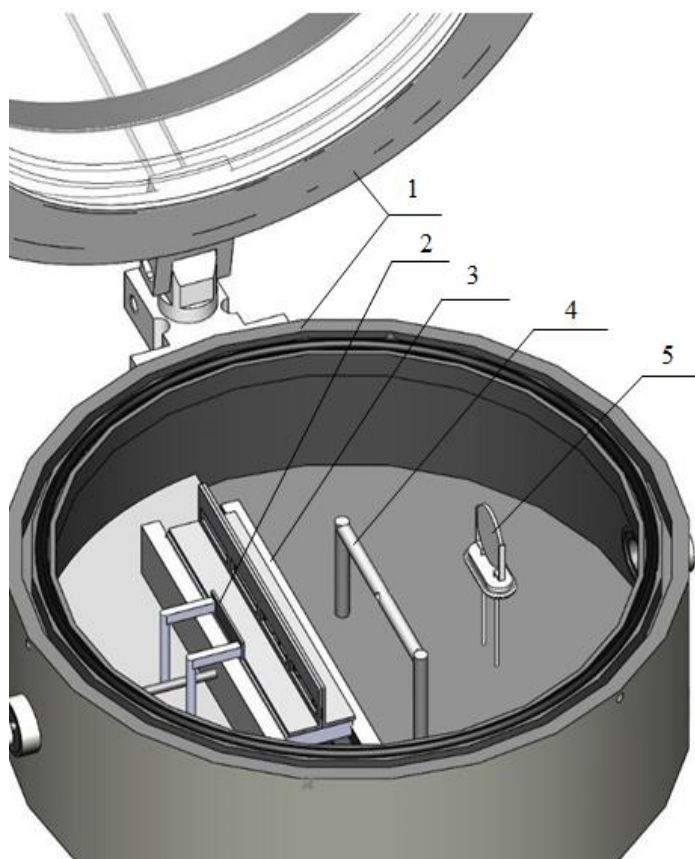


Рис. 2. 3D-модель вакуумной камеры в открытом виде:

**1 – вакуумная камера (основание с колпаком); 2 – силицидосодержащий образец;
3 – каретка с закреплёнными на ней масками; 4 – резистивный испаритель; 5 – датчик**

Fig. 2. 3D-model of the vacuum chamber in open form:

1 – vacuum chamber (base with hood); 2 – silicide-containing sample;
3 – carriage with masks fixed on it; 4 – resistive evaporator; 5 – sensor

Результат модернизации

Для реализации прототипа устройства были использованы вакуумная камера вакуумного универсального поста (ВУП-5), танталовая трубка в качестве резистивного испарителя, подвижная каретка с масками, силицидосодержащий образец, закреплённый в держатель. В качестве привода был использован шаговый двигатель.

В данной камере был проведён эксперимент по осаждению материала (Mg) на образец через маску. В качестве термоисточника использовалась танталовая трубка, концы которой были соединены с токовводами, в середине трубки было проделано отверстие для выхода испаряемого материала. Образец представлял собой пластину кремния. Откачным вакуумным

постом установлено давление 10^{-3} Па. Постоянным током осуществлялся нагрев танталовой трубки, происходило испарение материала из неё. В ходе эксперимента было установлено, что при указанном давлении толщина плёнки, формируемой на подложке, меньше, чем при аналогичных условиях её формирования в сверхвысоковакуумной камере с давлением 10^{-6} Па. Из чего сделано было заключение, что при давлении 10^{-3} Па велико рассеивание атомов испаряемого вещества за пределы подложки. Для создания направленного пучка было предложено расположить трубочку резистивного испарителя перпендикулярно относительно образца (развернув на 90° в сравнении с первым вариантом) (рис. 3). Концы трубки были открытыми, причём один из них направлен на датчик, другой – на образец, других отверстий в трубке нет. Материал должен быть плотно упакован в центре трубки. Токовводы присоединяются слева и справа от её центра на некотором расстоянии. В ходе многократного отражения атомов материала об стенки трубки испарителя создаётся направленный пучок атомов.

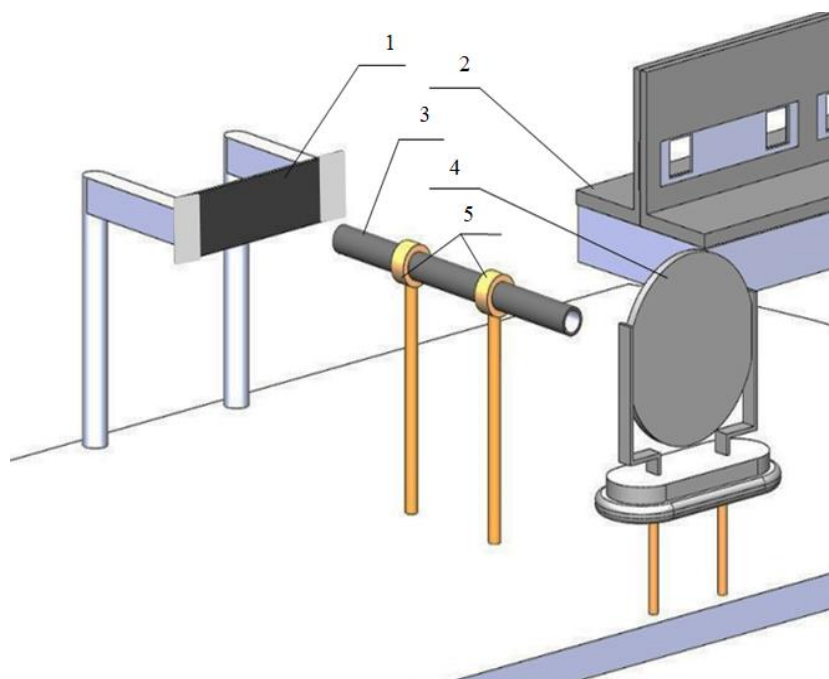


Рис. 3. 3D-вид системы осаждения из резистивного источника на образец с контролем толщины плёнки по датчику:

1 – силицидосодержащий образец; 2 – каретка с закреплёнными на ней масками; 3 – резистивный испаритель; 4 – датчик; 5 – токовводы

Fig. 3. 3D-view of the deposition system from a resistive source onto a sample with sensor-controlled film thickness:

1 – a silicide-containing sample; 2 – a carriage with masks fixed on it;
3 – a resistive evaporator; 4 – a sensor; 5 – current leads

Для нанесения металлических контактов на полупроводник наиболее часто используются золото, сурьма и алюминий. Из данных, приведённых в [30], была построена зависимость равновесного давления паров данных металлов от температуры (рис. 4). Как упоминалось ранее, давление, создаваемое в камере, составляет 10^{-3} Па. При данном давлении термоисточник необходимо нагревать до температур порядка 1300 К (в случае золота, для остальных металлов ниже), температура плавления тантала, из которого изготовлен термоисточник, составляет 3290 К, что гарантирует возможность осуществления напыления золота, сурьмы или алюминия из данного резистивного источника при данном давлении.

В используемой вакуумной камере на основе ВУП-5 не предоставляется возможным реализовать соосное расположение ведущего вала и вала каретки, ввиду наличия выступающих из основания камеры токовводов. Входящие в состав образец, каретка, источник и датчик были подняты относительно основания камеры на высоту, превышающую высоту токо-вводов

Вследствие этого возникла новая задача по осуществлению передачи движения от ведущего вала к каретке. Для её решения было предложено использование шатунного механизма. Другие варианты реализации передачи движения, например с использованием ременной или цепной передачи, неизбежно привели бы к ухудшению давления камеры за счёт газящих материалов, входящих в состав этих механизмов передачи.

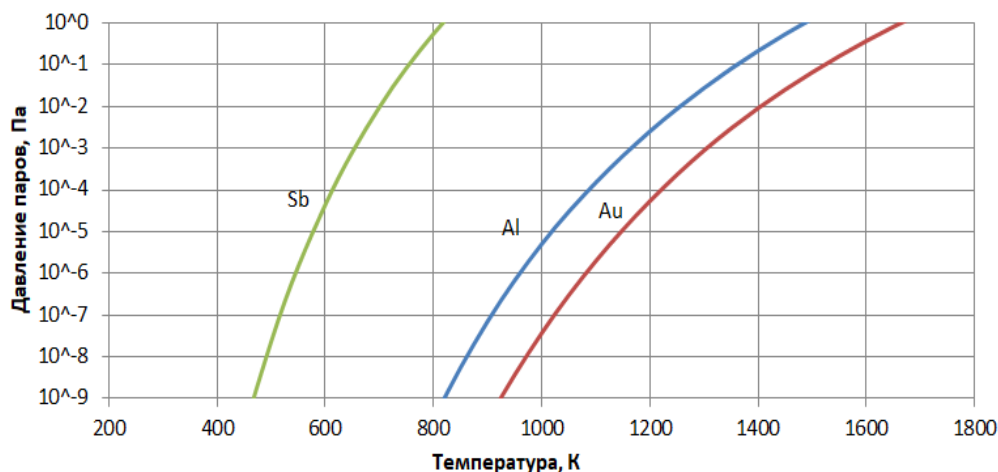


Рис. 4. Зависимость давления паров некоторых металлов от температуры

Fig. 4. Dependence of vapor pressure of some metals on temperature

Предложенный шатунный механизм (рис. 5) включает в себя два диска, сухие подшипники и шатун. Первый диск располагается на ведущем валу, проходящем через основание вакуумной камеры и систему вакуумизации, а второй диск – на валу, расположенном в основании каретки и отвечающем за преобразование вращательного движения в линейное поступательное. В каждом диске для соединения его посредством шатуна имеется отверстие, внутрь которого запрессовывается подшипник, в который в свою очередь запрессовывается один из концов шатуна.

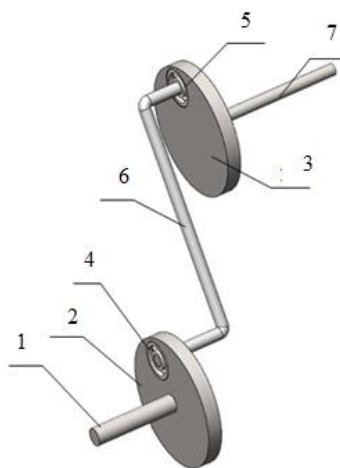


Рис. 5. 3D-модель шатунного механизма:

1 – ведущий вал; 2, 3 – диски; 4, 5 – сухие подшипники; 6 – шатун; 7 – вал каретки

Fig. 5. 3D-model of the connecting rod mechanism: 1 – drive shaft; 2, 3 – discs;
4, 5 – dry bearings; 6 – connecting rod; 7 – carriage shaft

В модернизированном устройстве (рис. 6) шаговый двигатель посредством ременной передачи (включающей в себя зубчатый ремень и два зубчатых шкива) передаёт вращение ведущему валу. Через шатунный механизм от ведущего вала передаётся вращательное движение валу, расположенному в основании каретки. Данный вал преобразует вращательное дви-

жение в линейное благодаря закреплённому на нём зубчатому колесу, двигающему плоскую рейку каретки. Тем самым путём преобразования вращательного движения в линейное возможно осуществление точного позиционирования масок на каретке относительно образца в горизонтальной плоскости. Датчик скорости сублимации легирующей примеси и образец при этом располагаются на одном расстоянии от центра испарителя для соблюдения условия по формированию одинакового количества испаряемого вещества в один момент времени на датчике и образце. При этом для получения более чёткого рельефа осаждаемого вещества образец располагается вплотную к маскам.

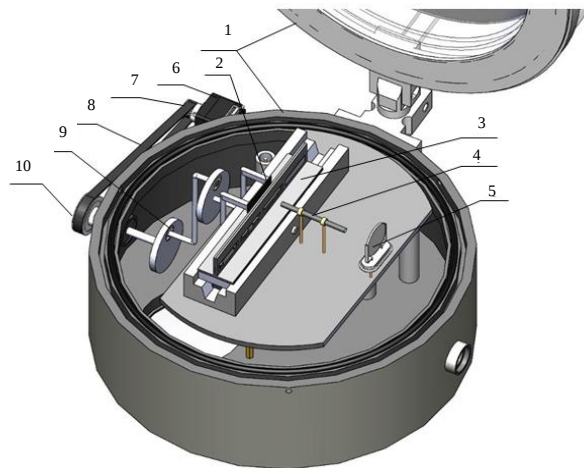


Рис. 6. 3D-модель реализуемого прототипа устройства смены масок:
1 – вакуумная камера (основание с колпаком); 2 – образец; 3 – каретка с закреплёнными на ней масками; 4 – термоисточник; 5 – датчик; 6 – шаговый двигатель;
7, 10 – зубчатые шкивы; 8 – ремень; 9 – шатунный механизм

Fig. 6. 3D-model of the implemented prototype of the mask changer:
 1 – vacuum chamber (base with hood); 2 – sample; 3 – carriage with masks fixed on it;
 4 – thermal source; 5 – sensor; 6 – stepper motor; 7, 10 – toothed pulleys; 8 – belt;
 9 – connecting rod mechanism

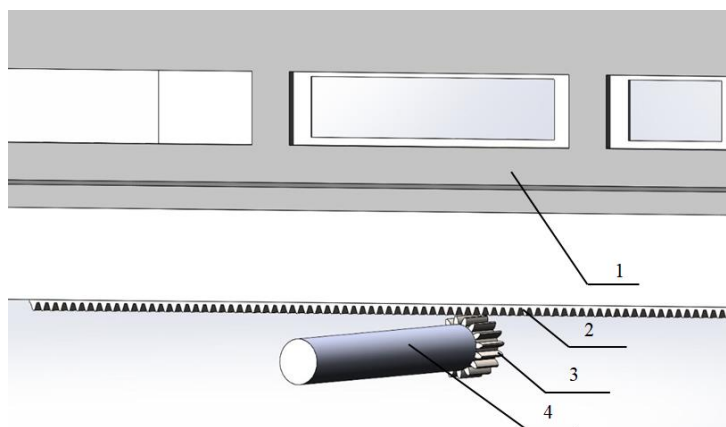


Рис. 7. Модель принципа преобразования вращательного движения от вала в линейное поступательное рейки:
1 – каретка с закреплёнными на ней масками; 2 – зубчатая рейка;
3 – зубчатое колесо; 4 – вал каретки

Fig. 7. Model of the principle of converting rotational motion from a shaft into a linear rotational rack:
 1 – carriage with masks fixed on it; 2 – gear rack; 3 – gear wheel; 4 – carriage shaft

Было определено минимальное перемещение каретки. Оно зависит от минимального угла поворота шагового двигателя ($1,8^\circ$ для наиболее распространённых моделей). Вращение на указанный угол вала двигателя передаётся расположенному на нём зубчатому шкиву с 20

зубьями и через ременную передачу далее передаётся шкиву с 40 зубьями, расположенному на ведущем валу, в результате чего последний поворачивается на $0,9^\circ$. Это приводит к вращению зубчатого колеса с диаметром делительной окружности 11,82 мм, расположенного на валу в основании каретки (рис. 7). А далее осуществляется преобразование вращательного движения в линейное поступательное, которое заставляет перемещаться зубчатую рейку на 0,19 мм в горизонтальной плоскости. Это позволяет установить минимальное прецизионное линейное перемещение маски относительно образца.

Заключение

Таким образом, в ходе разработки и модернизации прототипа устройства, предназначенного для автоматизации процесса легирования силицидосодержащих образцов, было достигнуто:

1) точное позиционирование масок относительно образца за счёт изменения способа передачи движения от ведущего вала к валу каретки. Добавлен шатунный механизм для передачи движения на высоту выше высоты тоководов, расположенных в камере. Минимальное перемещение каретки при угле поворота двигателя $1,8^\circ$ составило 0,19 мм;

2) своевременная смена масок в зависимости от скорости испарения осаждаемого материала за счёт использования датчика скорости, подключённого к микроконтроллеру. Изменена геометрия и ориентация на 90° резистивного испарителя относительно образца и датчика для получения направленного пучка атомов осаждаемого вещества.

Разработанный и модернизированный прототип позволяет осуществлять перемещение масок с высокой точностью и реализовать направленный процесс напыления примеси на образец в условиях высокого вакуума. Данное устройство можно использовать для создания полупроводниковых приборных структур с заданными свойствами на основе силицидосодержащих образцов.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Д.В. Фомин – разработка концепции и дизайна устройства; И.А. Рябов – создание 3D-моделей и подготовка текста; А.В. Поляков – редактирование текста; И.О. Шолыгин – сбор литературных данных. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

D.V. Fomin – development of the concept and design of the device; I.A. Ryabov – creation of 3D-models and text preparation; A.V. Polyakov – text editing; I.O. Sholygin – collection of literary data. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дубов В.Л., Фомин Д.В., Галкин Н.Г. Твёрдофазный рост и структура плёнок дисилицида бария на Si(111) // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (Национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 114–121. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-2-114-121>
2. Патент 2709280 С1 Российская Федерация, МПК В25J 21/00. Манипулятор, работающий в герметизированном объёме / А.А. Никитин: № 2019111550 : заявл. 16.04.2019 : опубл. 17.12.2019. EDN: VYXLRU
3. Brinkevich D., Volobuev V., Lukashevich M.G. [et al.]. Structure and electron-transport properties of photoresist implanted by Sb+Ions // Acta Physica Polonica A. 2011. Vol. 120, № 1. P. 46–48. DOI: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.120.46>
4. Galkin N.G., Goroshko D.L., Dubov V.L., Fomin D.V., Galkin K.N., Chusovitina E.A., Chusovitina S.V. SPE grown BaSi₂ on Si(111) substrates: Optical and photoelectric properties of films and diode heterostructures on their base // Japanese Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 59. № SF. Art. SFFA11. DOI: <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab6b76>

5. Galkin N.G., Fomin D.V., Dubov V.L., Galkin K.N., Pyachin S.A., Burkov A.A. Comparison of crystal and phonon structures for polycrystalline BaSi₂ Films grown by SPE method on Si(111) substrate // Defect and Diffusion Forum. 2018. № 386. P. 48–54. EDN: VHAZUA
6. Кесарев А.Г., Кондратьев В.В., Ломаев И.Л. К теории атомной диффузии после ионной имплантации // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119, № 11. С. 1160–1165.
7. Ремнев Г.Е., Тарбоков В.А., Павлов С.К. Модифицирование материалов при воздействии мощных ионных пучков // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 2. С. 5–26. DOI: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2021-2-5-26>
8. Козлов А.Г., Кривокубов О.В., Удод А.Н. Тонкие плёнки твёрдого протонопроводящего электролита на основе оксидов бария и церия // Вестник Омского университета. 2013. № 2(68). С. 70–74. EDN: RRQMRP
9. Krioni N.K., Mingazheva A.A., Mingazhev A.D. Increasing the wear resistance of machine parts made of aluminum alloys by ion nitriding with high-energy activation // Journal of Friction and Wear. 2024. Vol. 45, № 1. P. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366624700077>
10. Uglov V.V., Cherenda N.N., Khodasevich V.V. [et al.]. Formation of complex Al-N-C layer in aluminium by successive carbon and nitrogen implantation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1999. Vol. 147, № 1-4. P. 332–336. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00592-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00592-8)
11. Komarov F.F., Mil'chanin O.V., Parchomenko I.N. [et al.]. Influence of the laser pulse annealing of the silicon implanted with indium and arsenic ions on its optical and structural properties // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2024. Vol. 97, № 3. P. 745–752. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-024-02946-7>
12. Romanov I., Parkhomenko I., Vlasukova L. [et al.]. Fluence effect on photo- and electroluminescence of silica layers implanted with Sn⁺ ions // Materials Letters. 2022. Vol. 308. Art. 131070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131070>
13. Filintoglou K., Pinakidou F., Arvanitidis J. [et al.]. Size control of GaN nanocrystals formed by ion implantation in thermally grown silicon dioxide // Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 127, № 3. Art. 034302. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5132604>
14. Kharchenko A.A., Lukashevich M.G., Odzhaev V.B. [et al.]. Correlation of electronic and magnetic properties of thin polymer layers with cobalt nanoparticles // Particle and Particle Systems Characterization. 2013. Vol. 30, № 2. P. 180–184. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppsc.201200042>
15. Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Kalinin Y.E. [et al.]. Structure and electrical properties of Con(CoO)₁₀₀ – n thin-film composites // Technical Physics. 2024. Vol. 69, № 6. P. 1813–1822. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784224060458>
16. Galkin K.N., Kropachev O.V., Maslov A.M. [et al.]. Electronic structure and optical properties of Ca₂Si films grown on silicon different oriented substrates and calculated from first principles // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15, № S3.1. P. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.153.102>
17. Galkin N.G., Galkin K.N., Kropachev O.V. [et al.]. Formation, structure, and optical properties of singlephase CaSi and CaSi₂ films on Si substrates // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15, № S3.1. P. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.153.101>
18. Galkin N.G., Galkin K.N., Dotsenko S.A. [et al.]. Ca₂Si(100) epitaxial films on the Si(111) substrate: Template growth, structural and optical properties // Materials Science in Semiconductor Processing. 2020. Vol. 113. Art. 105036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105036>
19. Chusovitin E., Dotsenko S., Chusovitina S. [et al.]. Formation of a thin continuous GaSb film on Si(001) by solid phase epitaxy // Nanomaterials. 2018. Vol. 8, № 12. Art. 987. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano8120987>
20. Chernev I.M., Shevlyagin A.V., Galkin K.N. [et al.]. On the way to enhance the optical absorption of a-Si in NIR by embedding Mg₂Si thin film // Applied Physics Letters. 2016. Vol. 109, № 4. Art. 043902. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4960011>
21. Galkin N.G., Galkin K.N., Chernev I.M. [et al.]. Effect of sacrificial Mg₂Si layers and kinetic parameters on the growth, structure, and optical properties of thin Ca₂Si films on silicon substrates // Semiconductors. 2022. Vol. 56, № 7-12. P. 367–381. <https://doi.org/10.1134/s1063782622090019>
22. Jin Y., Fang H., Chen R. [et al.]. Graded distribution and refinement of Mg₂Si in Al–Mg₂Si alloy prepared by traveling magnetic field // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 24. P. 2319–2331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.152>

23. Jeon Ju., Lee S.H., Kim S.D. [et al.]. Ultrasound alters the nucleation pathway of primary Mg₂Si in a chemically modified multicomponent Al–Mg₂Si alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 1009. Art. 177001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177001>
24. Chernev I.M., Gouralnik A.S., Subbotin E.Yu. [et al.]. FeSi and CrSi₂ thin films as transparent conductive layers for VIS/SWIR sensitive Mg₂Si films grown on Si // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023. Vol. 87, № S3. P. 370–374. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1062873823705718>
25. Siminel N., Galkin K.N., Arushanov E., Galkin N.G. Photoconductivity study of Ca₂Si epitaxial film on Si(111) substrate // *Vacuum*. 2022. Vol. 203. Art. 111302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111302>
26. Myagkov V.G., Bykova L.E., Zhigalov V.S. [et al.]. Solid-state synthesis, magnetic and structural properties of epitaxial D03-Fe₃Rh(001) thin films // *Intermetallics*. 2023. Vol. 157. Art. 107871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.107871>
27. Патент 140712 U1 Российская Федерация, МПК H01L 21/265. Маска для ионного легирования в пластины карбида кремния / В.В. Афанаскин, Н.А. Брюхно, М.С. Воронцов [и др.]; ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»: № 2013150369/28 : заявл. 12.11.2013 : опубл. 20.05.2014. EDN: AYKSGG
28. Патент 2789662 C1 Российская Федерация, МПК H01L 21/02. Способ нанесения через жёсткую маску металлического рисунка на область с другим ранее нанесённым металлическим рисунком при производстве крышек корпусов неохлаждаемых термочувствительных элементов / К.А. Курыгин, И.М. Москаленко, А.А. Абакаров; ООО «Маппер»: № 2022118682: заявл. 08.07.2022 : опубл. 07.02.2023. EDN: EKEAIO
29. Патент 80048 U1 Российская Федерация, МПК G07F 11/16. Устройство перемещения товара в торговом автомате / Д.В. Щербаков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Комтоп» : № 2008118550/22 : заявл. 12.05.2008 : опубл. 20.01.2009. EDN: OBMWVU
30. Alcock C.B., Itkin V.P., Horrigan M.K. Vapour pressure equations for the metallic elements: 298–2500K // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1984. Vol. 23, № 3. P. 309–313. DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.1984.23.3.309>

REFERENCES

1. Dubov V.L., Fomin D.V., Galkin N.G. Solid-phase growth and structure of barium disilicide films on Si(111). *Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Korolev (National Research University)*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 114–121. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-2-114-121>
2. Patent 2709280 C1 Russian Federation, IPC B25J 21/00. A manipulator operating in a sealed volume / A.A. Nikitin: No. 2019111550 : application 04.16.2019 : published 12.17.2019. (In Russ.).
3. Brinkevich D., Volobuev V., Lukashevich M.G. [et al.]. Structure and electron-transport properties of photoresist implanted by Sb⁺ ions. *Acta Physica Polonica A*, 2011, vol. 120, no. 1, pp. 46–48. DOI: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.120.46>
4. Galkin N.G., Goroshko D.L., Dubov V.L., Fomin D.V., Galkin K.N., Chusovitina E.A., Chusovitina S.V. SPE grown BaSi₂ on Si(111) substrates: Optical and photoelectric properties of films and diode heterostructures on their base. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, vol. 59, no. SF, art. SFFA11. DOI: <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab6b76>
5. Galkin N.G., Fomin D.V., Dubov V.L., Galkin K.N., Pyachin S.A., Burkov A.A. Comparison of crystal and phonon structures for polycrystalline BaSi₂ films grown by SPE method on Si(111) substrate. *Defect and Diffusion Forum*, 2018, no. 386, pp. 48–54.
6. Kesarev A.G., Kondratiev V.V., Lomaev I.L. On the theory of atomic diffusion after ion implantation. *Physics of Metals and Metal Science*, 2018, vol. 119, no. 11, pp. 1160–1165. (In Russ.).
7. Remnev G.E., Tarbokov V.A., Pavlov S.K. Modification of materials under the influence of powerful ion beams. *Physics and Chemistry of Materials Processing*, 2021, no. 2, pp. 5–26. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2021-2-5-26>
8. Kozlov A.G., Krivozubov O.V., Udod A.N. Thin films of a solid proton-conducting electrolyte based on barium and cerium oxides. *Bulletin of Omsk University*, 2013, no. 2(68), pp. 70–74. (In Russ.).
9. Krioni N.K., Mingazheva A.A., Mingazhev A.D. Increasing the wear resistance of machine parts made of aluminum alloys by ion nitriding with high-energy activation. *Journal of Friction and Wear*,

- 2024, vol. 45, no. 1, pp. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366624700077>
10. Uglov V.V., Cherenda N.N., Khodasevich V.V. [et al.]. Formation of complex Al-N-C layer in aluminium by successive carbon and nitrogen implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1999, vol. 147, no. 1-4, pp. 332–336. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00592-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00592-8)
 11. Komarov F.F., Mil'chanin O.V., Parchomenko I.N. [et al.]. Influence of the laser pulse annealing of the silicon implanted with indium and arsenic ions on its optical and structural properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2024, vol. 97, no. 3, pp. 745–752. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-024-02946-7>
 12. Romanov I., Parkhomenko I., Vlasukova L. [et al.]. Fluence effect on photo- and electroluminescence of silica layers implanted with Sn⁺ ions. *Materials Letters*, 2022, vol. 308, art. 131070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131070>
 13. Filintoglou K., Pinakidou F., Arvanitidis J. [et al.]. Size control of GaN nanocrystals formed by ion implantation in thermally grown silicon dioxide. *Journal of Applied Physics*, 2020, vol. 127, no. 3, art. 034302. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5132604>
 14. Kharchenko A.A., Lukashevich M.G., Odzhaev V.B. [et al.]. Correlation of electronic and magnetic properties of thin polymer layers with cobalt nanoparticles. *Particle and Particle Systems Characterization*, 2013, vol. 30, no. 2, pp. 180–184. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppsc.201200042>
 15. Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Kalinin Y.E. [et al.]. Structure and electrical properties of Con(CoO)100 – n thin-film composites. *Technical Physics*, 2024, vol. 69, no. 6, pp. 1813–1822. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784224060458>
 16. Galkin K.N., Kropachev O.V., Maslov A.M. [et al.]. Electronic structure and optical properties of Ca₂Si films grown on silicon different oriented substrates and calculated from first principles. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2022, vol. 15, no. S3.1, pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.153.102>
 17. Galkin N.G., Galkin K.N., Kropachev O.V. [et al.]. Formation, structure, and optical properties of singlephase CaSi and CaSi₂ films on Si substrates. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2022, vol. 15, no. S3.1, pp. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.153.101>
 18. Galkin N.G., Galkin K.N., Dotsenko S.A. [et al.]. Ca₂Si(100) epitaxial films on the Si(111) substrate: Template growth, structural and optical properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, vol. 113, art. 105036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105036>
 19. Chusovitina E., Dotsenko S., Chusovitina S. [et al.]. Formation of a thin continuous GaSb film on Si(001) by solid phase epitaxy. *Nanomaterials*, 2018, vol. 8, no. 12, p. 987. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano8120987>
 20. Chernev I.M., Shevlyagin A.V., Galkin K.N. [et al.]. On the way to enhance the optical absorption of a-Si in NIR by embedding Mg₂Si thin film. *Applied Physics Letters*, 2016, vol. 109, no. 4, art. 043902. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4960011>
 21. Galkin N.G., Galkin K.N., Chernev I.M. [et al.]. Effect of sacrificial Mg₂Si layers and kinetic parameters on the growth, structure, and optical properties of thin Ca₂Si films on silicon substrates. *Semiconductors*, 2022, vol. 56, no. 7-12, pp. 367–381. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063782622090019>
 22. Jin Y., Fang H., Chen R. [et al.]. Graded distribution and refinement of Mg₂Si in Al–Mg₂Si alloy prepared by traveling magnetic field. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 24, pp. 2319–2331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.152>
 23. Jeon Ju., Lee S.H., Kim S.D. [et al.]. Ultrasound alters the nucleation pathway of primary Mg₂Si in a chemically modified multicomponent Al–Mg₂Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 1009, p. 177001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177001>
 24. Chernev I.M., Gournalnik A.S., Subbotin E.Yu. [et al.]. FeSi and CrSi₂ thin films as transparent conductive layers for VIS/SWIR sensitive Mg₂Si films grown on Si. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2023, vol. 87, no. S3, pp. 370–374. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1062873823705718>
 25. Siminel N., Galkin K.N., Arushanov E., Galkin N.G. Photoconductivity study of Ca₂Si epitaxial film on Si(111) substrate. *Vacuum*, 2022, vol. 203, art. 111302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111302>
 26. Myagkov V.G., Bykova L.E., Zhigalov V.S. [et al.]. Solid-state synthesis, magnetic and structural properties of epitaxial D0₃-Fe₃Rh(001) thin films. *Intermetallics*, 2023, vol. 157, art. 107871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.107871>

27. Patent 140712 U1 Russian Federation, IPC H01L 21/265. Mask for ion alloying in silicon carbide plates / V.V. Afanaskin, N.A. Bryukhno, M.S. Vorontsov [et al.]; CJSC GROUP-PA SILICON EL.: No. 2013150369/28: declared 12.11.2013 : publ. 20.05.2014. (In Russ.).
28. Patent 2789662 C1 Russian Federation, IPC H01L 21/02. A method of applying a metal pattern through a rigid mask to an area with another previously applied metal pattern in the manufacture of body covers for uncooled thermosensitive elements / K.A. Kurygin, I.M. Moskalenko, A.A. Abakarov; Mapper LLC.: No. 2022118682: declared 07.07.2022: publ 07.02.2023. (In Russ.).
29. Patent 80048 U1 Russian Federation, IPC G07F 11/16. The device for moving goods in a vending machine / D.V. Shcherbakov; the applicant is the Kom-top Limited Liability Company. : No. 2008118550/22 : application. 05.12.2008: published. 01.20.2009. (In Russ.).
30. Alcock C.B., Itkin V.P., Horrigan M.K. Vapour pressure equations for the metallic elements: 298–2500K. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1984, vol. 23, no. 3, pp. 309–313. DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.1984.23.3.309>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фомин Дмитрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, директор научно-образовательного центра им. К.Э. Циолковского, Амурский государственный университет (Благовещенск, Российская Федерация).

✉ e-office@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5474-5281>

Dmitry V. Fomin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center named after K.E. Tsiolkovsky, Amur State University (Blagoveshchensk, Russian Federation).

Рябов Илья Александрович – лаборант, Амурский государственный университет (Благовещенск, Российская Федерация).

✉ rybovilay@gmail.com

Ilya A. Ryabov, Laboratory Assistant, Amur State University (Blagoveshchensk, Russian Federation).

Шолыгин Илья Олегович – магистрант 2 года обучения, Амурский государственный университет (Благовещенск, Российская Федерация).

✉ ilia.sholygin235@bk.ru

Ilya O. Sholygin, Master's student of 2 years of study, Amur State University (Blagoveshchensk, Russian Federation).

Поляков Алексей Вячеславович – младший научный сотрудник, Амурский государственный университет (Благовещенск, Российская Федерация).

✉ polyakov_a_1999@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5104-5966>

Alexey V. Polyakov, Junior Scientific Assistant, Amur State University (Blagoveshchensk, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 04.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 28.02.2025

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

Научная статья

УДК 532.582

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/15-25>

Анализ влияния моделей турбулентности, топологии сетки и характеристик потока на точность прогнозирования гидродинамических характеристик изолированного гребного винта

Рами Мамдух Али✉, Мохаммед Аднан Ризк

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ ramimamdouhali@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается влияние модели турбулентности, топологии сетки и характеристик потока на точность численного прогнозирования гидродинамических характеристик гребного винта в широком диапазоне относительной поступи. Уравнения RANS решены с помощью Ansys Fluent для оценки гидродинамических характеристик модели изолированного гребного винта типа E779A. Достоверность численных результатов была проверена известными экспериментальными данными; численно-экспериментальное сравнение показало хорошее соответствие. Были представлены и проанализированы значения коэффициентов упора, момента и КПД для различных моделей турбулентности и топологий сетки как в стационарном, так и в нестационарном потоке. Установлено, что использование переходной модели турбулентности в сочетании с гексаэдрической сеткой гарантирует высокий уровень точности определения гидродинамических характеристик изолированного гребного винта.

Ключевые слова: гребной винт, INSEAN E779A, CFD, RANS, Ansys Fluent, модели турбулентности, испытания изолированного гребного винта

Для цитирования: Али Р.М., Ризк М.А. Анализ влияния моделей турбулентности, топологии сетки и характеристик потока на точность прогнозирования гидродинамических характеристик изолированного гребного винта // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 15–25.

SHIP THEORY AND STRUCTURAL MECHANICS

Original article

Analysis of the impact of turbulence models, grid topology and flow characteristics on the precision of propeller's hydrodynamic performances predictions in open water tests

Rami M. Ali ✉, Mohammed A. Rizk

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ ramimamdouhali@gmail.com

Abstract. The effects of the turbulence model, grid topology, and flow characteristics on the accuracy of numerical prediction of propeller hydrodynamic performance were studied over a wide range of advance ratios. RANS equations were solved with Ansys Fluent to evaluate the hydrodynamic coefficients of the E779A propeller model in the open water tests. The validity of the numerical results was examined by a published experimental benchmark; the numerical-experimental comparison revealed a good agreement. Thrust coefficient, torque, and efficiency were presented and analysed for different turbulence models and grid topologies

in both steady and unsteady flow. It is found that using the transition turbulence model in conjunction with the hexahedral grid guarantees a high level of accuracy of the propeller hydrodynamic performance in the open water tests.

Keywords: marine propeller, INSEAN E779A, CFD, RANS, Ansys Fluent, turbulence models, open water tests

For citation: Ali R.M., Rizk M.A. Analysis of the impact of turbulence models, grid topology, and flow characteristics on the precision of propeller's hydrodynamic performances predictions in open water tests. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 15–25. (In Russ.).

Introduction

The hydrodynamic performance of the propeller has been assessed by researchers using a variety of methods. The initial approaches were experimental methods and empirical models. Later, many numerical methods based on potential theory were developed, including the Blade Element Theory (BET), Blade Element Momentum Theory (BEMT), Integral Boundary Layer Method (IBLM), and Boundary Element Method (BEM). As the Computational Fluid Dynamics (CFD) has advanced and computer performance has continued to rise, viscous solutions have grown in popularity and versatility. However, many factors, including CAD geometry, topology, size of computational domain, meshing strategy, and physical modelling, greatly influence the results obtained by the viscous method. As a result, many researchers are interested in precisely determining how these factors affect the propeller's hydrodynamic properties.

The choice of the grid topology affects both the solver's capabilities and the accuracy of the results, so it's crucial to select the appropriate topology for the problem being addressed. Sikirica A. et al assessed the suitability of the hybrid and hexahedral grids for forecasting maritime propeller performances [1]. They evaluated the hydrodynamic properties of PPTC using SST $k-\omega$ and realizable $k-\epsilon$ turbulent models. The numerical computations were performed with STAR-CCM+ and Ansys Fluent. According to their findings, both hexahedral and hybrid grids yield comparable results; however, when compared to SST $k-\omega$, the realizable $k-\epsilon$ models yield more accurate results, particularly at high advance ratios. J. Morgut and Nobile also investigated the impact of mesh type and turbulence model on the accuracy of propeller performances [2]. They studied the hydrodynamic performance of two different propellers, E779A and P5168 types. Two different mesh types were used: hybrid mesh and hexahedral mesh. The flow around the propellers was computationally modeled with the CFX software using two turbulence models, SST and RSM. They reported that the different meshes and turbulence models used in their research had shown comparable levels of accuracy. Tu T.N., in his work, used two different grids: hexahedral and polyhedral, and two turbulence models to examine the PPTC propeller's hydrodynamic performances in open water tests [3]. The numerical results of the RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) solver indicated that both turbulence models have a similar degree of accuracy, but the hexahedral mesh produced slightly more accurate results than the polyhedral. Wang and Walters compared the hydrodynamic properties of the propeller using the SST $k-\omega$ turbulence model and the transition-sensitive turbulence model TSM [4]. Their results indicated that the calculated thrust with the TSM model showed improvement compared to the SST model, but the relative errors remain large when compared to experimental values. However, other authors' works, including those of [2], [5] and [6], also examined the impact of the turbulence model and reported that the effectivity of turbulence models depends directly on the advance ratio.

Many researchers have used the viscous model to evaluate the propeller's hydrodynamic performance [7–11] but most studies used two-equation turbulence models and were limited to comparing only two models - one of which was commonly SST $k-\omega$ turbulence model. Despite its advantages, in terms of adaptability to complicated surfaces like propellers, the tetrahedral grid has received insufficient attention and comparison. The steady-state assumption, commonly used in propeller performances prediction, may not capture all dynamic interactions, so it is worth comparing it to the unsteady-state assumption.

In this paper, the viscous flow around a four-blade propeller was simulated over a wide range of advance ratios. Various turbulence models were implemented, effects of steady and un-

steady assumptions on the propeller performance were investigated and analysed across various grid topologies.

Problem definition

Propeller geometry

This study will employ the E7794 propeller to numerically simulate the flow and explore the propeller's hydrodynamic properties in open water tests. E7794 is a four-blade, fixed-pitch, low-skew propeller designed in 1959 by the Italian Ship Model Basin (INSEAN) for hydrodynamic and hydro-acoustic experiments. It is well documented in the literature, making it a benchmark for confirming numerical results. Experimental data used throughout the course of this study were carried out in INSEAN towing tank and publicly accessible under the name INSEAN E779A Propeller Experimental Dataset [12]. However, the propeller shape and physical attributes are depicted in the (Fig.) and (Table 1), respectively.

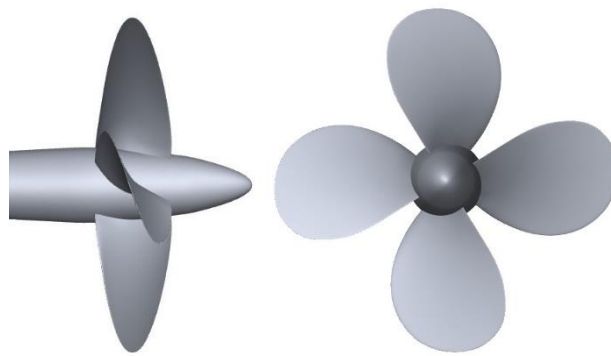


Fig. 1. The geometry of E7794 propeller

Table 1

Principal particulars of E7794 propeller

Diameter	D	m	0.2273
Expanded Area	A_e/A_0	-	0.6890
Nominal Pitch	P	m	0.2500
Pitch Ratio	P/D	-	1.1000
Number of Blades	Z	-	4
Boss Ratio	r_h/R	-	0.2000
Skew Angle at Blade Tip	θ_s^{tip}	deg	4.3500
Hub Diameter	D_h	m	0.0455
Hub Length	L_h	m	0.0683
Reference chord	c	m	0.0870
Nominal Rake	i	deg	4.5833

Nondimensionality

The thrust T , torque Q , and efficiency of the propeller are expressed in terms of dimensionless coefficients K_T , K_Q , and η_0 , as follows:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad (1)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad (2)$$

$$\eta_0 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi}, \quad (3)$$

where D is the diameter of the propeller, n is the rotational speed of the propeller and ρ is the density of the fluid. J is the advance ratio that describe the relationship between the speed at which the ship is moving forward V_A and the speed at which its propeller is turning, J is given as follows:

$$J = \frac{V_A}{nD}, \quad (4)$$

Governing equations

Navier-Stokes and continuity equations provide a complete mathematical description of the flow of incompressible Newtonian fluids, the differential forms of these equations are as follows:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (6)$$

Where μ is the dynamic viscosity, p is the pressure, u_i is the velocity vector and $x_{i,j}$ is the spatial vector.

These equations are discretized over the domain using the well-known finite volume method FVM. To characterize the turbulent flow around the propeller in a way that achieves a balance between accuracy and computational cost, RANS is used. According to RANS, averaged Navier-Stokes's equations for incompressible flow are written as follows:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_j u_i})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}), \quad (7)$$

Where: τ_{ij} is the viscous stress, while $\rho \overline{u'_i u'_j}$ is the Reynolds stress.

The appearance of Reynolds stress makes the previous set of equations unclosed and unsolvable set. To close this system of equations, it is necessary to model the turbulence and estimate the value of τ . In this study, various turbulence models will be used to close the system, and their impact on the prediction of propeller's hydrodynamic performance will be evaluated and compared. Turbulence models intended to be studied are listed and classified here according to their number of equations: one equation (Spalart-Allmaras), two-equation (RNG k-epsilon, realized k-epsilon, SST k-omega), and a three-equation model (transition k-kl-omega).

Numerical formation

Computational domain

A cylindrical domain with a diameter of 5D was used to simulate the flow around the propeller; the inlet and outlet were placed at a distance of 3D upstream and 5D downstream from the propeller plan, respectively. To handle the propeller rotation, the domain is equipped with a coincided cylinder that encloses the propeller disc and forms the rotary domain.

Grid generation

Three types of mesh; Hexahedral, Tetrahedral and poly-hexcore mesh were generated by Ansys Fluent Meshing tool. The non-dimensional wall distance y^+ for all typologies of grids was kept unchanged, the average value of y^+ on solid surfaces is 6. $y^+ = u_t y / \nu$, where u_t is the friction velocity, y is the distance to the wall, and ν is the kinematic viscosity of the fluid. However, to accurately capture the flow characters fine zones surrounds propeller tips and hub were added.

The computational domain is presented in (Fig. 1), a general view highlighting different zones of the computational domain is shown in (Fig. 2).

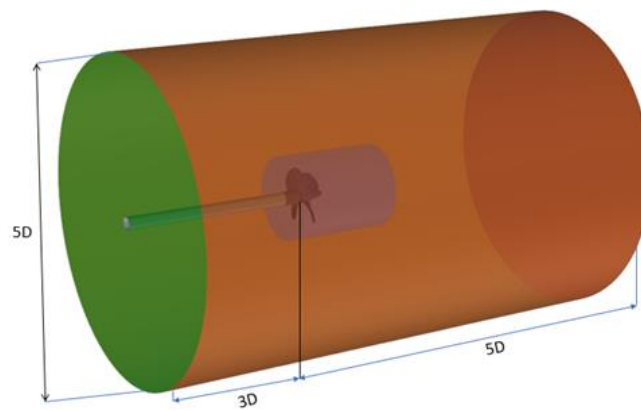


Fig. 1. General view of the computational domain

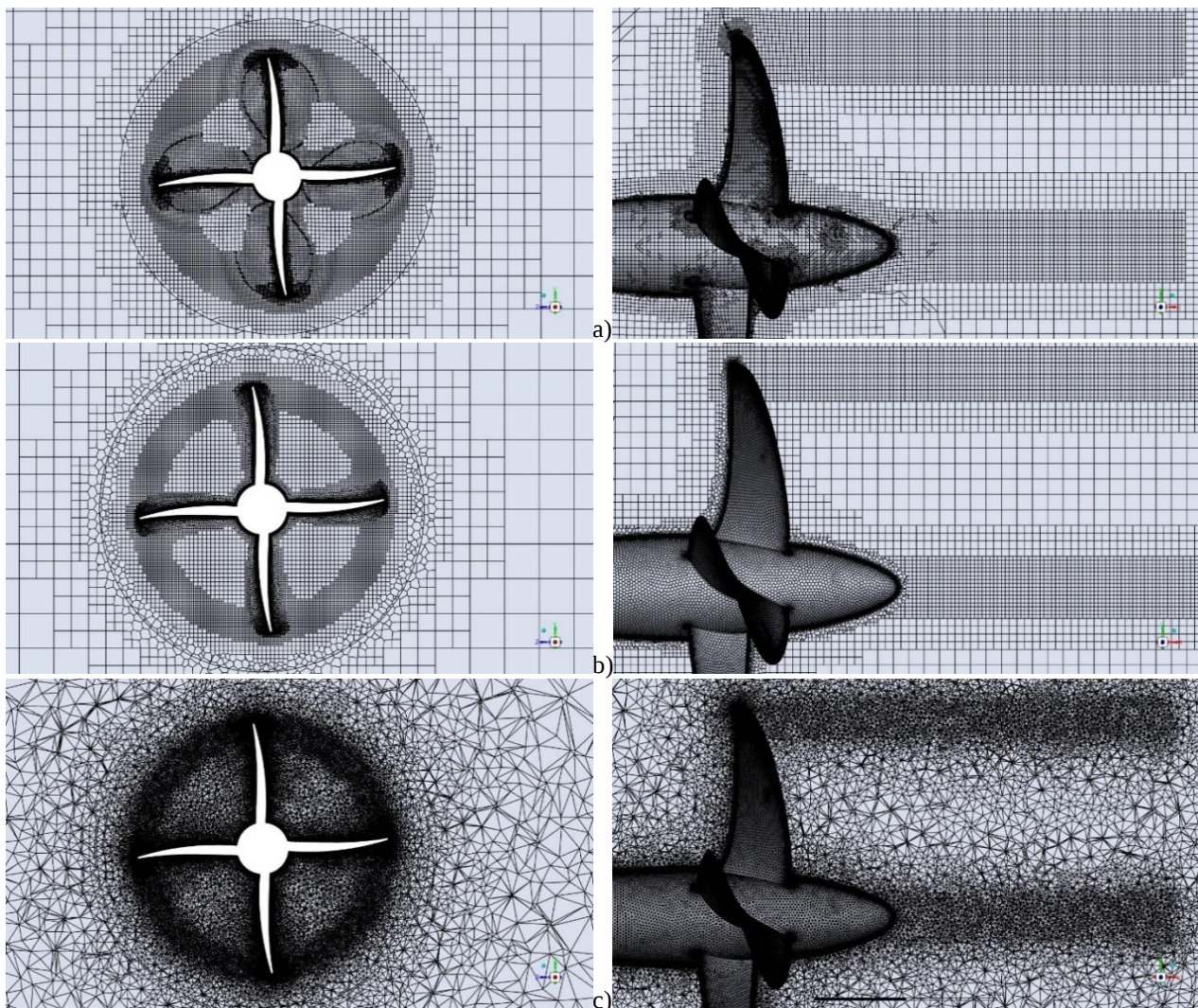


Fig. 2. Overview of the computational domain and Grid structure around E779A propeller: (a) hexahedral mesh; (b) poly-hexcore mesh; (c) tetrahedral mesh.

Numerical settings

Finite Volume Method (FVM) is used to discrete the flow domain into a finite number of control volumes. Ansys fluent is used to simulate the viscous flow for propeller open water tests and solve the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations.

Simulations were conducted over a range of advance coefficients $J \in [0 \sim 1.145]$, corresponded to the range of Reynolds numbers $[462647 - 520462]$. The Reynolds number was defined

as $Re = \frac{C_{0.7} \sqrt{V_A^2 + (0.7\pi nD)^2}}{\nu}$, where $C_{0.7}$ was the propeller blade chord at 70% of radius, D and n is the diameter and rotational speed propeller, respectively. ν is the kinematic viscosity.

The propeller rotation is simulated using the moving reference frame (MRF) approach, rotational speeds were set at $n = 11.7881$ [rps]. Turbulence intensity Tu and eddy viscosity ratio μ_t/μ are set to 2% and 10 respectively [13]. The time step for unsteady simulations was set to $\Delta t = 2.35 \cdot 10^{-4}$ [s] corresponds to one degree of propeller rotation.

According to the environment of the experimental work, the water condition is modeled as fresh water at 16°C, the corresponding value of density ρ and kinematic viscosity ν are set to $\rho = 102.06$ [KgS²/m⁴] and $1.1099 \cdot 10^{-6}$ [m²/S], respectively.

Uniform flow velocity condition is set on the inlet, a Slip conditions to the stator surface and no-Slip condition was imposed to Shaft, hub and blade walls. On the outlet zero Pa static pressure was imposed.

Grid convergence study

Seven successive poly-hexcore grids with a refinement factor $r_G = \sqrt{2}$ and average $y^+ \approx 6$ were created. Grid convergence was studied at $J = 0.747$ using steady simple solver and SST k-omega turbulence model. Numerical results and experimental data were compared, grid sizes and relative errors are provided in (Table 2). According to the presented results, the grid “6” will be used.

Table 2

Convergence study results with SST k-omega turbulence model at $j=0.747$

i	Cell counts	$r_G=\sqrt{2}$	Kt CFD	Kq CFD	η CFD	Kt Exp	Kq Exp	η Exp	Error kt%	Error kq%	Error Eta%
1	951542	8.00	0.2083	0.03974	0.623	0.222	0.041	0.652	6.152	1.886	4.3472
2	1064283	5.66	0.2088	0.03974	0.625				5.905	1.889	4.0938
3	1269072	4.00	0.2088	0.03964	0.626				5.944	2.121	3.9054
4	1444123	2.83	0.2094	0.03971	0.627				5.662	1.960	3.7761
5	2096776	2.00	0.2098	0.03981	0.627				5.473	1.714	3.8249
6	2572131	1.41	0.2099	0.03985	0.626				5.442	1.599	3.9052
7	6087811	1.00	0.2100	0.03986	0.6265				5.423	1.580	3.9049

Results

Effect of turbulent model

The propeller's hydrodynamic performances are investigated using a steady-state solver over a poly-hexcore mesh (hybrid). In (Fig. 3) the experimental results are compared with the numerical results obtained by two-equation turbulence models: RNG, Realizable k-Epsilon, and KW SST turbulence models.

In general, the numerical results obtained with RNG and Realizable k-Epsilon turbulence models agree well with the experimental values of K_T and K_Q over the entire range of the examined advance ratio j except for the narrow range $j \in [0 \sim 0.149]$. Outside of this range, both models slightly overestimate the torque coefficient K_Q and underestimate the thrust coefficient K_T . The numerical results obtained by KW SST are directly related to the advance coefficient j . At low values of j , KW SST accurately predicts the thrust coefficient K_T while slightly overestimates the torque coefficient K_Q . At high values of j , it slightly underestimates both K_Q and K_T . However, comparing the numerical results of all analysed two-equation models reveals that KW SST better predicts K_T and K_Q values across the whole range of j .

Regarding efficiency, the investigated tow-equation turbulence models accurately predict the efficiency at low advance ratios, but clearly underestimate it at high advance ratios. However, the

KW SST turbulence model predicts efficiency more accurately than the other models studied over the entire values of j , except for $j = 1.145$ where realizable k-Epsilon model is better. The error in evaluating propeller efficiency at $j = 0.845$ reaches -9.3% for RNG k- ϵ , -8.1% for realizable k- ϵ , and only -6.1% for SST k- ω model.

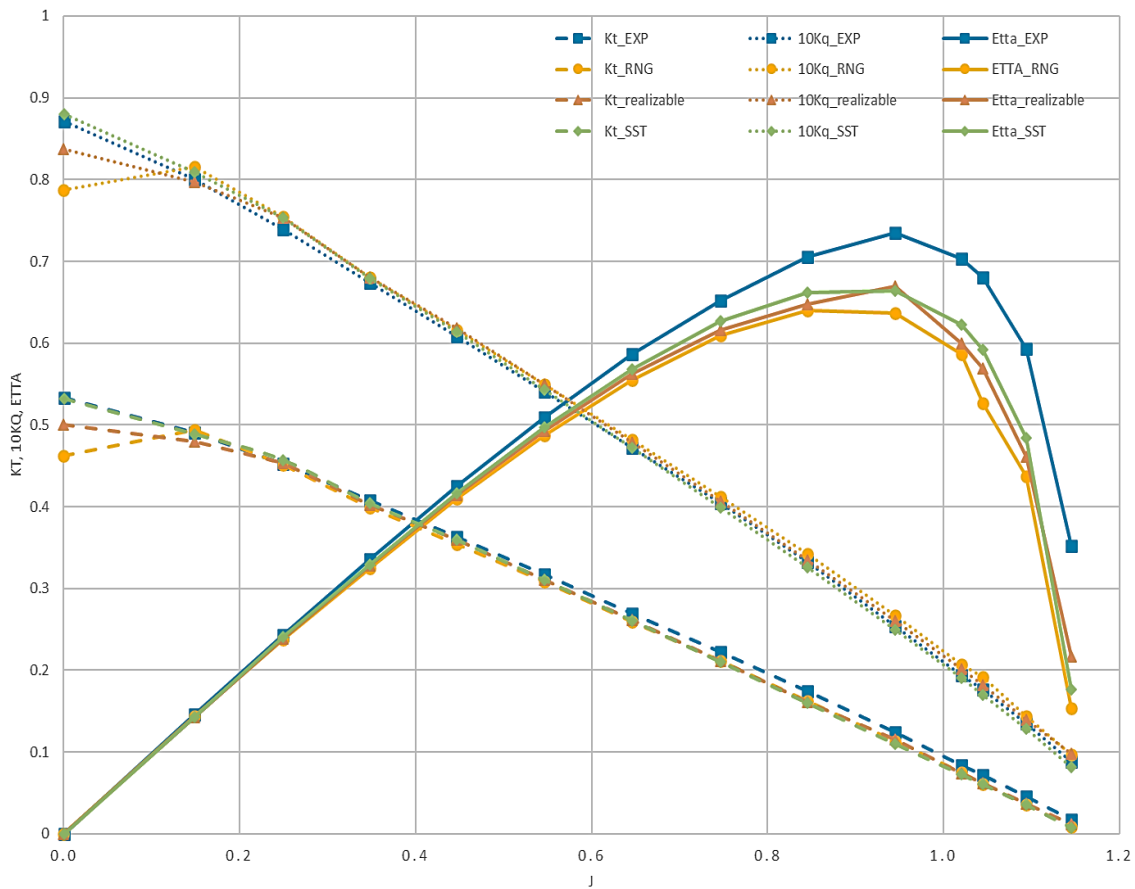


Fig. 3. Propeller hydrodynamic curves using two-equation turbulence models. Hybrid mesh, steady state.

To investigate the effect of the turbulence model's number of equations on the numerical prediction accuracy, one-, two- and three-equation models were used. The results were validated against experimental data in (Fig. 4).

The numerical results of the studied turbulence models generally agree well with the experimental results for the thrust and torque coefficients over the entire range of the advance ratio j , with the exception of the narrow range of $j \in [0 \sim 0.149]$, where one- and three-equation models (Spalart-Allmaras and k- κ - ω , respectively) significantly underestimate both the thrust and torque coefficients. However, outside this range, the one-equation model (Spalart-Allmaras) underestimates the thrust coefficient while overestimates the torque coefficient. Both two- and three-equation models (KW SST and k- κ - ω , respectively) accurately predict the thrust coefficient, but their ability to predict the torque coefficient varies with the advance ratio, since both overestimate the torque coefficient at low advance ratios and underestimate it at high advance ratios.

Regarding efficiency; the studied models accurately predict propeller efficiency η at low advance ratios j , while at high advance ratios the discrepancy between numerical and experimental values increases significantly. (Fig. 4) shows that the relative error committed in evaluating the efficiency at advance ratio $j = 0.945$ is approximately -13.2% for the one-equation model, -9.6% for the two-equation model, and 3.1% for the three-equation model. However, curves of propeller efficiency also indicate an improvement in the estimation ability as the number of equations of the turbulence model increases.

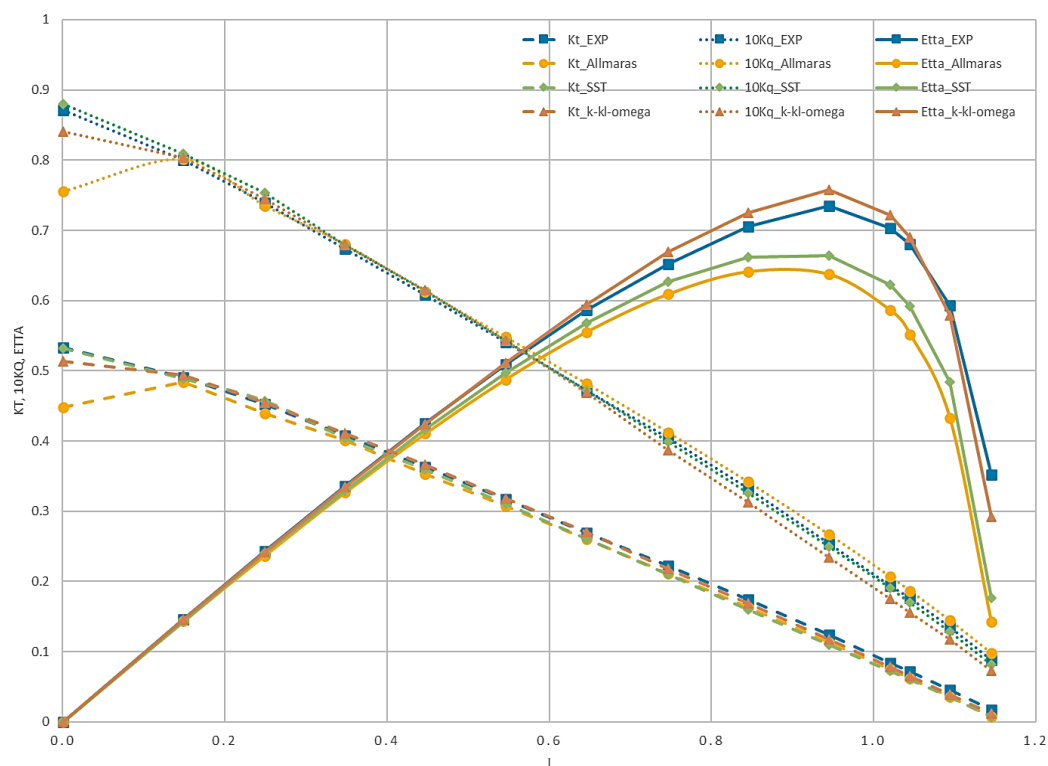


Fig. 4. Propeller hydrodynamic curves using different type of turbulence models. Hybrid mesh, steady state.

Effect of mesh topology

To investigate the effect of mesh topology on propeller hydrodynamic performance prediction, a steady-state numerical simulation is performed using a three-equation turbulence model (k-kl-omega) and three distinct mesh topologies: hexahedral, tetrahedral, and poly-hexcore (Fig. 6).

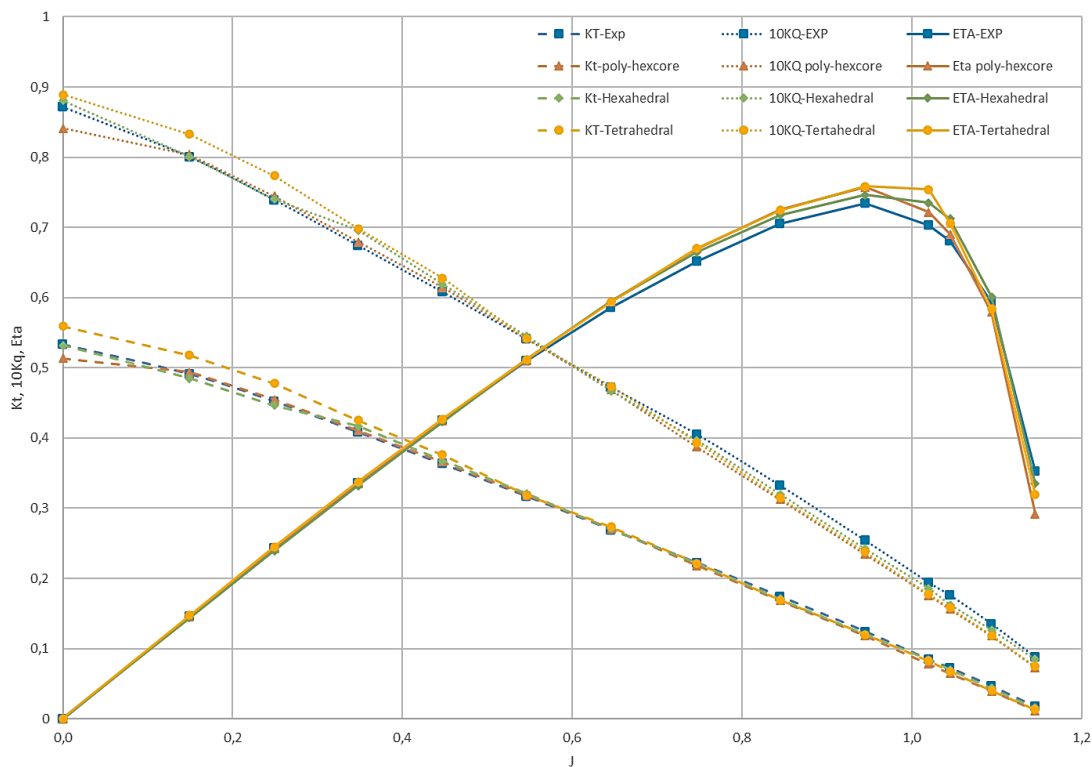


Fig. 5. Propeller hydrodynamic performance using different grid topology, transition turbulence model, steady state.

Tetrahedral mesh clearly overestimates thrust and torque coefficients at low advance ratios while underestimates them at high advance ratios, the tetrahedral mesh yields the least accurate findings among the topologies tested.

The hexahedral and poly-hexcore topologies produce similar outcomes and are more consistent with experimental results than the tetrahedral mesh. However, numerical results from poly-hexcore meshes correspond better with experimental data at low advance ratios, but hexahedral meshes are more accurate at higher advance ratios.

Regarding efficiency, hexahedral mesh outperforms tetrahedral and poly-hexcore meshes across the whole examined range of advance ratios, with the exception of $j \in [1.02 \sim 1.045]$, where poly-hexcore mesh appears to be more accurate.

At $j = 0,945$, the error in evaluating propeller efficiency reaches 3.24% for tetrahedral, 3.08% for poly-hexcore and only 1.60% for the hexahedral mesh.

Effect of steady and unsteady assumptions on the propeller's hydrodynamic performances

SIMPLE unsteady solver was used to study the effect of steady and unsteady assumption on the numerical prediction of propeller's hydrodynamic performance. Investigation was carried out using three-equation turbulence model (k-kl-omega) on hexahedral mesh. However, to generalize results, the simulations were repeated on different mesh topologies (tetrahedral and poly-hexcore) and presented in (Fig. 6).

(Fig. 6) indicates that using unsteady assumptions did not improve the numerical simulation of the tetrahedral mesh at all, but did slightly improve the hexahedral and poly-hexcore mesh results at high advance ratios. Using unsteady solver reduced the inaccuracy at $j = 1.094$ from 1.29% to -1.09% for hexahedral mesh and from -2.38 to -1.02% for poly-hexcore mesh.

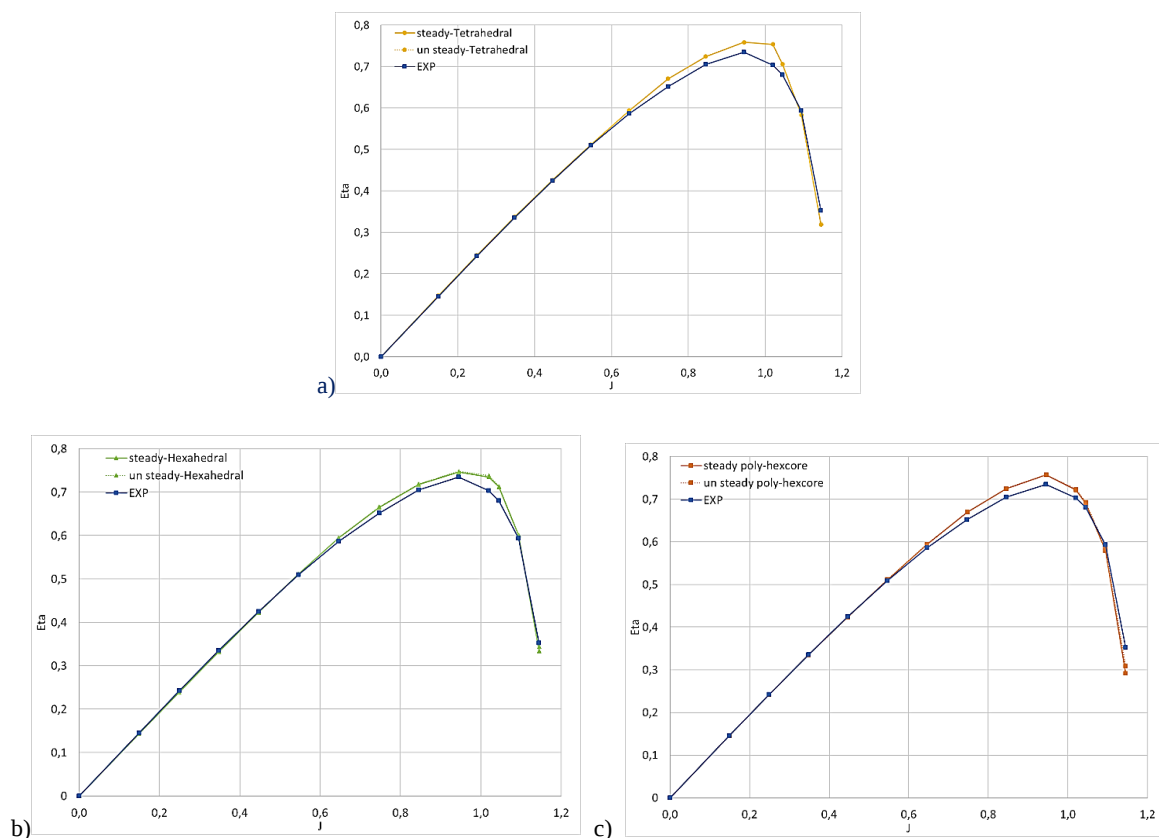


Fig. 6. steady and unsteady evaluation of propeller performance using transition turbulence model and different grid topology.

Conclusion and recommendations

A series of systematic computations were performed to investigate the influence of the grid topology, turbulence model, and steadiness assumption on the accuracy of propeller hydrodynamic

performance prediction over a wide range of advance ratios j . Ansys fluent was used to conduct numerical simulations on the E779A propeller model. The propeller hydrodynamic coefficients K_T , K_Q , and η were evaluated in open water tests using RANS in both steady and unsteady approximations. The turbulent models under consideration included (Spalart-Allmaras, RNG k-epsilon, realized k-epsilon, SST k-omega, and transition k-kl-omega). The simulations used three distinct grid topologies (hexahedral, tetrahedral, and poly-hexcore).

The results obtained in this work can be summarized as follows:

- Among the analysed two-equation models (RNG k-epsilon, realized k-epsilon, and SST k-omega), the SST k-omega turbulence model had the best ability to predict the propeller's hydrodynamic performances over the entire range of studied advance ratios.
- When more equations are used in turbulence models, the numerical results become more accurate.
- The transition three-equation turbulence model (k-kl-omega) predicts propeller performance better than the one- and two-equation models evaluated.
- Hexahedral grids outperform poly-hexcore and tetrahedral grids in terms of properly predicting propeller performances at various advance ratios.

Unsteady assumptions had no impact on the numerical simulation of the tetrahedral mesh, but they did slightly improve the hexahedral and poly-hexcore mesh results only at high advance ratios.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Р.М. Али, М.А. Ризк – анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

R.M. Ali, M.A. Rizk – analysis and interpretation of results; draft manuscript preparation. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sikirica A., Čarija Z., Kranjčević L., Lučin I. Grid type and turbulence model influence on propeller characteristics prediction // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019. Vol. 7. № 10. Art. 374. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7100374>.
2. Morgut M., Nobile E. Influence of grid type and turbulence model on the numerical prediction of the flow around marine propellers working in uniform inflow // *Ocean Engineering*. 2012. Vol. 42. P. 26–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.01.012>
3. Tu T.N. Numerical simulation of propeller open water characteristics using RANSE method // *Alexandria Engineering Journal*. 2019. Vol. 58. № 2. P. 531–537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.005>
4. Wang X., Walters K. Computational analysis of marine-propeller performance using transition-sensitive turbulence modeling // *Journal of Fluids Engineering*. 2012. Vol. 134. № 7. Art. 071107. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4005729>.
5. Nakisa M. and A.M.J. and A.A.M. Assessment of marine propeller hydrodynamic performance in open water via CFD: Proceedings of The 7th International Conference on Marine Technology (MARTEC 2010). 2010. P. 35–44.
6. Helal M.M., Ahmed T.M., Banawan A.A., Kotb M.A. Numerical prediction of sheet cavitation on marine propellers using CFD simulation with transition-sensitive turbulence model // *Alexandria Engineering Journal*. 2018. Vol. 57. № 4. P. 3805–3815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.03.008>
7. Корнелюк О. Способы задания граничных условий и геометрии гребного винта в Flow Vision // *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2018. № 5(77). С. 74–81.
8. Месропян А.В., Шабельник Ю.А. О влиянии параметров сеточной модели при формировании расчётной области на примере гребного винта // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2021. № 2(92). С. 41–47.
9. Белая А.Б., Яковлев А.Ю. Forecasting of modern propeller characteristics by OpenFoam // *Marine Intellectual Technologies*, 2020. № 3(49). P. 40–47.

10. Belhenniche S.E. et al. Effect of pressure pores size on hydrodynamic and hydroacoustic marine propeller performances under cavitating case // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 307. Art. 118164.
11. Rizk M.A. et al. Cavitation Predictions of E779A Propeller by a RANSE-based CFD and Its Performance Behind a Generic Hull // *Journal of Marine Science and Application*. 2023. Vol. 22. № 2. P. 273–283.
12. Alves Pereira F.J. et al. Description of the INSEAN E779A Propeller Experimental Dataset. 2006.
13. Ali R., Tryaskin N.V. Numerical study on effect of the turbulence initial conditions on transition flow over 2D airfoil // *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2019. Vol. 31. № 6. P. 203–214.

REFERENCES

1. Sikirica A., Čarija Z., Kranjčević L., Lučin I. Grid type and turbulence model influence on propeller characteristics prediction. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, vol. 7, no. 10, art. 374. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7100374>
2. Morgut M., Nobile E. Influence of grid type and turbulence model on the numerical prediction of the flow around marine propellers working in uniform inflow. *Ocean Engineering*, 2012, vol. 42, pp. 26–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.01.012>
3. Tu T.N. Numerical simulation of propeller open water characteristics using RANSE method. *Alexandria Engineering Journal*, 2019, vol. 58, no. 2, pp. 531–537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.005>
4. Wang X., Walters K. Computational analysis of marine-propeller performance using transition-sensitive turbulence modelling. *Journal of Fluids Engineering*, 2012, vol. 134, no. 7, art. 071107.
5. Nakisa M. and A.M.J. and A.A.M. Assessment of marine propeller hydrodynamic performance in open water via CFD: Proceedings of The 7th International Conference on Marine Technology (MAR-TEC 2010). 2010. P. 35–44.
6. Helal M.M., Ahmed T.M., Banawan A.A., Kotb M.A. Numerical prediction of sheet cavitation on marine propellers using CFD simulation with transition-sensitive turbulence model. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, no. 4, pp. 3805–3815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.03.008>.
7. Kornelyuk O. Methods of specifying boundary conditions and propeller geometry in Flow Vision. *Science and progress of transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 2018, no. 5(77), pp. 74–81. (In Russ.).
8. Mesropyan A.V., Shabelnik Yu.A. On the influence of grid model parameters in the formation of the computational domain using the example of a propeller. *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2021, no. 2(92), pp. 41–47. (In Russ.).
9. Belaya A.B., Yakovlev A. Yu. Forecasting of modern propeller characteristics using OpenFoam. *Marine Intellectual Technologies*, 2020, no. 3(49), pp. 40–47. (In Russ.).
10. Belhenniche S.E. et al. Effect of pressure pores size on hydrodynamic and hydroacoustic marine propeller performances under cavitating case. *Ocean Engineering*, 2024, vol. 307, art. 118164.
11. Rizk M.A. et al. Cavitation Predictions of E779A Propeller by a RANSE-based CFD and Its Performance Behind a Generic Hull. *Journal of Marine Science and Application*, 2023, vol. 22, no. 2, pp. 273–283.
12. Alves Pereira F.J. et al. Description of the INSEAN E779A Propeller Experimental Dataset. 2006.
13. Ali R., Tryaskin N.V. Numerical study on effect of the turbulence initial conditions on transition flow over 2D airfoil. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2019, vol. 31, no. 6, pp. 203–214.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Али Рами Мамдух – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

✉ ramimamdouhali@gmail.com

Rami Mamdouh Ali, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russian Federation).

Ризк Мохаммед Аднан – магистрант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

✉ mohammed1995rizk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5084-1129>

Mohammed Adnan Rizk, Master's Student, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 12.11.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 11.02.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

Научная статья

УДК 629.5.011

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/26-37>

Прочность и эффективность наружных ледовых усиления в районах с продольной системой набора

Сергей Всеволодович Каленчук¹, Александр Витальевич Котлярский^{2,✉},
Виктор Анатольевич Кулеш², Хиен Чунг Фам³

¹ Дальневосточный центр судостроения и судоремонта,
Владивосток, Российская Федерация

² Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация,

³ Исследовательский институт кораблестроения,
Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам

✉ kotliarskii.av@dvfu.ru

Аннотация. Практика судостроения достаточно широко использует наружные усиления корпусов судов, например в виде привальных брусков для швартовок или в виде брусковых килей для контактов с грунтом, а также в других случаях. В последние годы всё большее распространение в мире и в отечественной практике получают наружные ледовые усиления корпусов в районе ватерлиний. Они достаточно эффективны в качестве защиты от износа и повышают прочность наружной обшивки на действие льда. Особую актуальность такие усиления имеют для судов иностранной постройки, работающих в российских условиях. Наибольшие повреждения характерны в районах носовых бульбов и в районах с продольной системой набора. Практика реализации наружных ледовых усилений включает широкий спектр конструктивных решений, которые не обеспечены регламентацией в нормативных документах классификационных обществ и недостаточно отражены в научно-технической литературе. В работе рассмотрен широкий круг вопросов по анализу прочности и эффективности наружных ледовых усилений для районов корпуса с продольной системой набора. Выполнены сравнения вариантов решений и показаны направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: корпус судна, наружные ледовые усиления, прочность, эффективность

Для цитирования: Каленчук С.В., Котлярский А.В., Кулеш В.А., Фам Ч.Х. Прочность и эффективность наружных ледовых усилений в районах с продольной системой набора // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 26–37.

Original article

Strength and effectiveness of external ice reinforcements in areas with a longitudinal scantling system

Sergei V. Kalenchuk¹, Alexander V. Kotlyarsky^{2,✉}, Victor A. Kulesh², Hiep Trung Pham³

¹ Far Eastern Shipbuilding and Repair Center, Vladivostok, Russian Federation

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation,

³ Research Institute of Shipbuilding, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam

✉ kotliarskii.av@dvfu.ru

Abstract. The practice of shipbuilding makes extensive use of external reinforcements of ship hulls, for example in the form of rubbing strake for mooring or in the form of bar keels for contact with the ground, as well as in other cases. In recent years, external ice reinforcement of hulls in the waterline area has become increas-

ingly widespread in the world and in domestic practice. They are quite effective as a wear protection and increase the strength of the shell plating against the forces of ice. Such reinforcements are of relevance for foreign-built vessels operating in Russian conditions. The greatest damage is typical in the areas of the bulb stem and in areas with a longitudinal scantling system. The practice of implementing external ice reinforcements includes a wide range of constructive solutions that are not regulated in the regulatory documents of classification societies and are not sufficiently reflected in the scientific and technical literature. The paper considers a wide range of issues related to the analysis of the strength and effectiveness of external ice reinforcements for hull areas with a longitudinal scantling system. Comparisons of solution options are made and directions for further research are shown.

Keywords: ship's hull, external ice reinforcements, strength, efficiency

For citation: Kalenchuk S.V., Kotlyarsky A.V., Kulesh V.A., Pham Tr.H. Strength and effectiveness of external ice reinforcements in areas with a longitudinal scantling system. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 26–37. (In Russ.).

Опыт проектирования, эксплуатации и наружных усиления

Российский флот является самым приспособленным в мире к работе в ледовых условиях. Безопасность и прочность отечественных судов определяется заложенными методическими основами [1, 2], которые использовали описания параметров и форм эпюр расчётных ледовых нагрузок при взаимодействии с острыми и скруглёнными кромками льда, а также допускали текучесть обшивки на опорах. Дальнейшее развитие этих основ [3, 4] привело к тезису о более широком использовании резервов предельной пластической прочности, включая набор, но при понижении внимания к формам эпюр ледовых нагрузок. Не оспаривая целесообразность использования таких резервов, нужно отметить и недостатки методик предельного анализа в отношении конструкций, включающих связи с существенно разной жёсткостью (пластины обшивки и балки набора).

В настоящее время дополнительные возможности для анализа и проектирования конструкций дают программы, реализующие метод конечных элементов (МКЭ). Российский морской регистр судоходства (РМРС) формально учитывает такие возможности документом [5], который отдаёт приоритет упругому анализу балочных моделей с контролем допускаемых напряжений, определяемых через коэффициенты Правил [6] (часть II, Корпус). Аналогичные документы иностранных классификационных обществ (ИКО) отличаются более широким отражением возможностей использования МКЭ и моделирования конструкций. Например, документ DNV-GL (Норвежский Веритас и Германский Ллойд) [7] имеет на порядок больший объём, чем [5]. Однако прямой анализ прочности МКЭ в принципе невозможен при отсутствии параметров и формы эпюр расчётных нагрузок. Дискуссии по этому вопросу продолжаются [1–4, 8–9], но без отражения результатов в документах РМРС для решения прикладных задач. Исключением является фрагмент Правил РМРС [10] (часть XVII, Дополнительные символы) в отношении судов с классами PC (Polar Class) по международной классификации. Однако и здесь роль МКЭ ограничена только анализом рамного набора, без представления формы эпюр ледовых нагрузок в явном виде.

Повреждения судов при плавании во льдах сохраняют актуальность. В большей мере они относятся к судам иностранной постройки, покупаемым для российских условий. Наиболее тяжёлые случаи характерны для носовых бульбов и районов с продольной системой набора (рис. 1а). Для снижения повреждений в мировой (Япония и ряд стран Тихоокеанского бассейна) и в отечественной практике всё большее распространение получают наружные ледовые усиления (НЛУ). Такие усиления представляют собой внешние приварные полосы, чаще полукруглого сечения и в ряде случаев под углом к горизонту (рис. 1б).

Простота и эффективность НЛУ часто кажется очевидной с позиции защиты от повышенного износа обшивки. Но роль НЛУ в повышении прочности обшивки ледового пояса также существенна. Специфика продольной системы набора в том, что пластины наружной обшивки сильно вытянуты и не имеют поперечных опор на протяжении до 6–7 шпаций (рис. 1с и 1д). Из-за стеснённости пространства в форпиках и у форштевней проектанты часто

оставляют набор только одного направления (например, платформы). Зона ледовых давлений локальна по высоте и также вытянута по горизонтали, что наиболее неблагоприятно для таких пластин. Повысить прочность этих пластин горизонтальными полосами НЛУ практически невозможно. Остаётся вариант ориентации полос НЛУ под углом к горизонту для обеспечения опор на продольном наборе. Примеры таких усилений даны на рис. 1с и 1d.

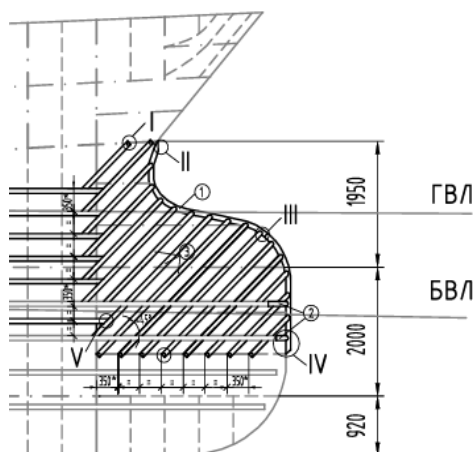
Сотрудники Департамента морской техники и транспорта ДВФУ уделяют вопросам НЛУ много внимания. Так, в работе [11] показано отличие оценок НЛУ с позиции предельной прочности и в упругом состоянии, а также возможность отрицательного эффекта в последнем случае. В работе [12] дан пример реализации НЛУ судна для работы на Северном морском пути (СМП). Обобщение опыта 10 лет эксплуатации судна с НЛУ дано в работе [13]. Анализ эффективности полос НЛУ под углом к горизонту рассматривался в работе [14], но только с позиции предельной прочности и использования неудачного (размерного) критерия. Ниже изложены результаты продолжения этих работ с позиции местной конструктивной ледовой прочности.



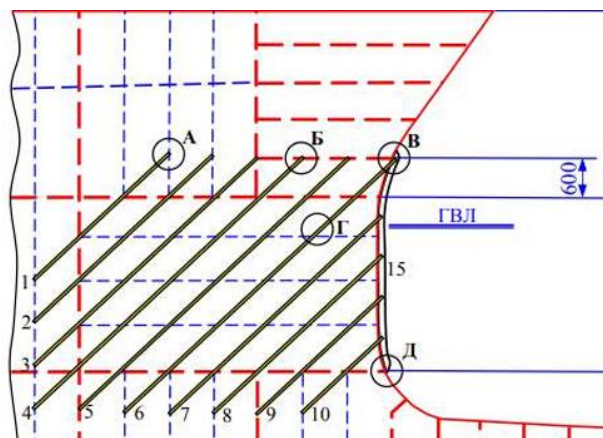
а) танкер водоизмещением 4404 тонны
a) tanker with a displacement of 4404 tons



б) японская промысловая шхуна
b) Japanese fishing schooner



с) танкер 1730 тонн
c) tanker of 1730 tons



д) рефрижератор 16744 тонн
d) refrigerator of 16744 tons

Рис. 1. Примеры ледовых повреждений (а) и схем НЛУ (б, с, d) судов

Fig. 1. Examples of ice damage (a) and schemes of EIR (b, c, d) ships

Анализ упругой прочности на балочных моделях

Выше отмечено, что для прямых расчётов прочности корпусных конструкций МКЭ РМРС ориентирован на балочные модели. Поэтому в первую очередь рассмотрены такие возможности при НЛУ. Модели прямоугольных пластин были представлены в виде системы ортогональных полос. При этом использовались принципы сохранения толщины и уровня прочности – напряжений, соответствующих справочным значениям. Такие модели под равномер-

ным поперечным давлением показали отличия наибольших напряжений от справочных значений – от 4 до 10% (в безопасную сторону) в широком диапазоне соотношения сторон от 1:7 до 1:1 соответственно. Это позволило применить такие балочные модели в решении более сложной задачи, в том числе при пиковой эпюре ледовых давлений в виде треугольной призмы и при наличии НЛУ. Расчёты выполнялись для схемы на рис. 1d. Регламентируемые параметры ледовой нагрузки $952 \text{ кПа} \times 0,695 \text{ м} \times 4,9 \text{ м}$ соответствовали ледовому классу Ice2.

Учитывая, что регламентация ледовых связей РМРС базируется на критериях предельной пластической прочности, интерес представляет оценка уровней наибольших напряжений в упругой стадии работы при толщинах обшивки, соответствующих требованиям на момент постройки и на 5-летний класс с износом. Расчёты показали, что в районах наружной обшивки с рекомендуемой РМРС поперечной системой набора уровни напряжений могут существенно превышать напряжения текучести и доходить до:

329 МПа – при толщине обшивки, требуемой на момент постройки;

745 МПа – при допускаемых остаточных толщинах на класс РМРС.

Эти значения превышают предел текучести обычных сталей в 1,4 и 3,2 раза.

На следующем этапе решена задача с НЛУ наиболее слабых пластин наружной обшивки в районе с продольной системой набора в форпике у форштевня (рис. 2). Расчёты выполнены для двух случаев усиления обшивки наружными полосами полукруглого сечения с радиусами 30 и 37,5 мм. Толщина обшивки принята соответствующей 13 мм – по замерам остаточных толщин при дефектации. Параметры сечений полос определялись с присоединённым пояском шириной 164 мм (1/6 пролёта). Результаты показали:

1. При радиусе сечений полос 30 мм ледовая прочность повышается в 1,6 раза, при этом напряжения в сегментах превышают напряжения в обшивке всего на 2%.

2. При радиусе полос 37,5 мм ледовая прочность повышается в 1,7 раза, при этом напряжения в сегментах даже меньше, чем в обшивке, на 18%.

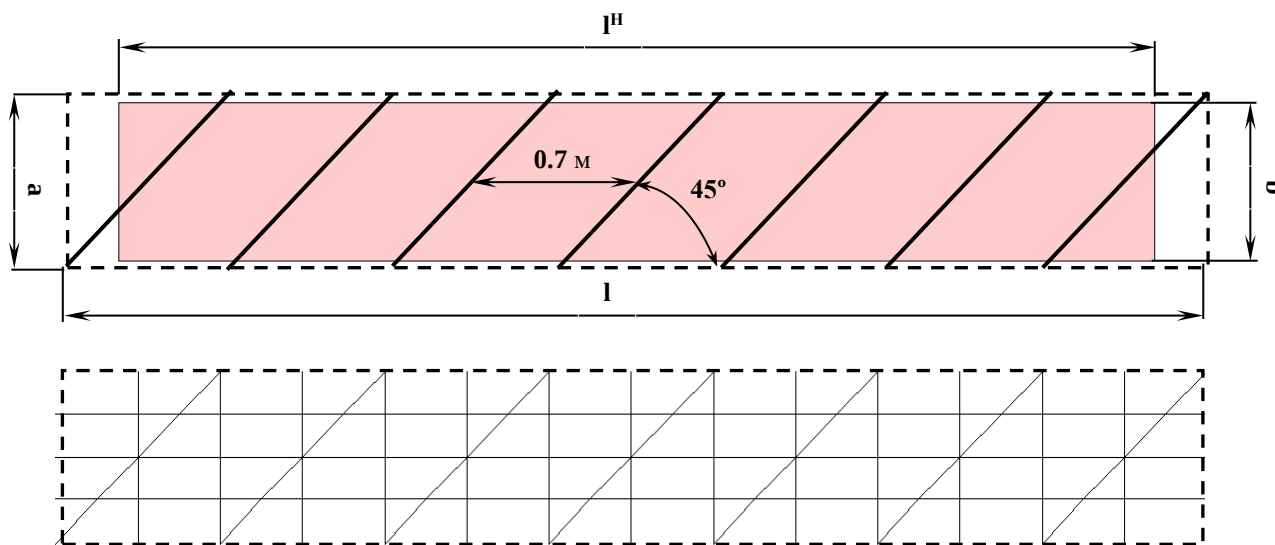


Рис. 2. Балочная модель пластины с НЛУ под углом 45°

Fig. 2. Beam model of a plate with an EIR at an angle of 45°

Учитывая эти результаты и то, что износ наружных полос происходит более ускоренно, чем обшивки, для проекта усиления был выбран 2-ой вариант с радиусом 37,5 мм.

Анализ упругой прочности на пластинчатых моделях

Отличия изгибной жёсткости обшивки и наружных полос вызывают вопрос о достоверности полученных в рамках балочных моделей оценок повышения прочности. Для его решения анализ продолжен на пластинчатых моделях. На рис. 3а показан участок борта с выделением границ зоны давлений, а также эпюра напряжений и прогибов без НЛУ (рис. 3б).

Рассмотрено 2 типа моделей. Модель 1 – изолированная прямоугольная пластина $13 \times 695 \times 4900$ мм с жёсткой опорой и заделкой кромок. Модель 2 – комплекс из четырёх пластин (рис. 3а) с аналогичными условиями по контуру. Ледовая нагрузка приложена только на вторую (сверху) пластину. На рис. 3б показаны эпюры напряжений и прогибов при отсутствии НЛУ.

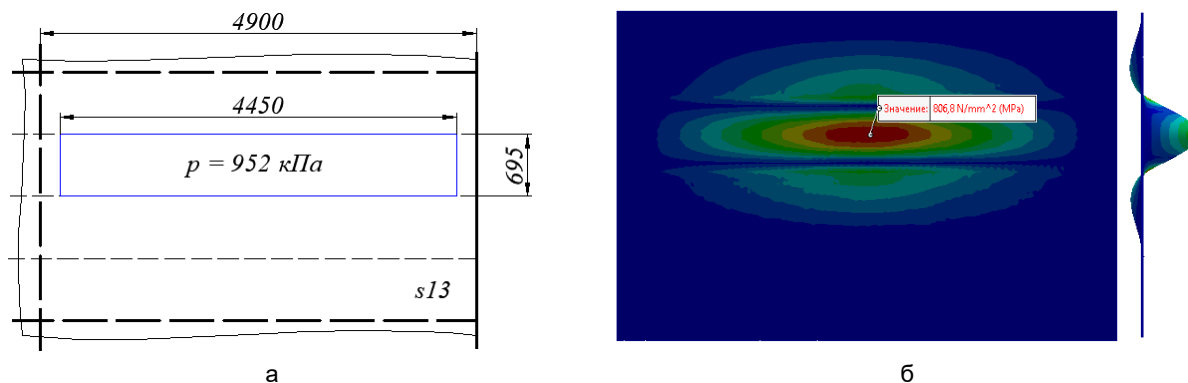


Рис. 3. Схема участка борта с выделением зоны ледовых давлений (а) и эпюра напряжений (б) с сечением по линии прогибов (справа)

Fig. 3. Diagram of the side section with the allocation of the ice pressure zone (a) and the stress diagram (b) with a section along the deflection line (right)

Для модели 1 (изолированной пластины) произведено варьирование ограничения на максимальный размер сетки конечных элементов с 50 до 25 мм. Сравнения показали, что такое изменение приводит к росту напряжений и числа элементов в 3–4 раза. При этом рост наибольших напряжений составляет:

- 12% – при отсутствии НЛУ пластины;
- 4% – при усилении полосами с радиусом 30 мм;
- 3% – при усилении полосами с радиусом 37,5 мм.

Рост наибольших прогибов модели не превысил 4,5%. Таким образом, рекомендации DNV-GL [7] по ограничению размеров сетки приемлемы для инженерных оценок в таких задачах. С учётом этого последующие расчёты использовали только ограничение в 50 мм.

Уровень наибольших напряжений в обшивке без НЛУ составил 768 МПа, что значительно меньше (в 1,7 раза) полученного ранее (1309 МПа) на основе балочных моделей. Таким образом, пластинчатые модели выявляют существенные резервы прочности обшивки в сравнении с балочными моделями, и это заслуживает учёта.

С позиции соотношения прочности полос НЛУ и обшивки получена существенная разница. Напряжения в полосах (радиусом 37,5 мм) составляют 652 МПа и в 1,72 раза больше напряжений в обшивке у пластинчатой модели, а у балочной модели они составляют 622 МПа, но это в 1,22 раза меньше напряжений в обшивке. Переоценка относительной прочности полос в балочных моделях полагается связанной с «классическим» присоединённым пояском обшивки. Это означает, что регламентация присоединённых поясков в таких задачах требует уточнения в сторону их уменьшения и с учётом того, что обшивка в виде балок-полосок уже включается в ортогональную систему, заменяющую пластину (рис. 2). В целом пластинчатые модели в таких задачах представляются более предпочтительными.

Для моделей 2 (комплекса из 4-х пластин) выполнен целый ряд расчётов с вариациями калибров (радиусов) полос, интервалов их размещения и углов положения.

Расчёты показали возможность повышения прочности за счёт НЛУ в 2 раза и более, но при определённом соотношении радиусов сечений и интервалов размещения полос. При уменьшении радиусов с одновременным увеличением интервалов расчёты показали отрицательный эффект понижения прочности – наибольшие напряжения пластины с НЛУ превышают уровень напряжений в пластине без усиления (рис. 4б, значения менее 1).

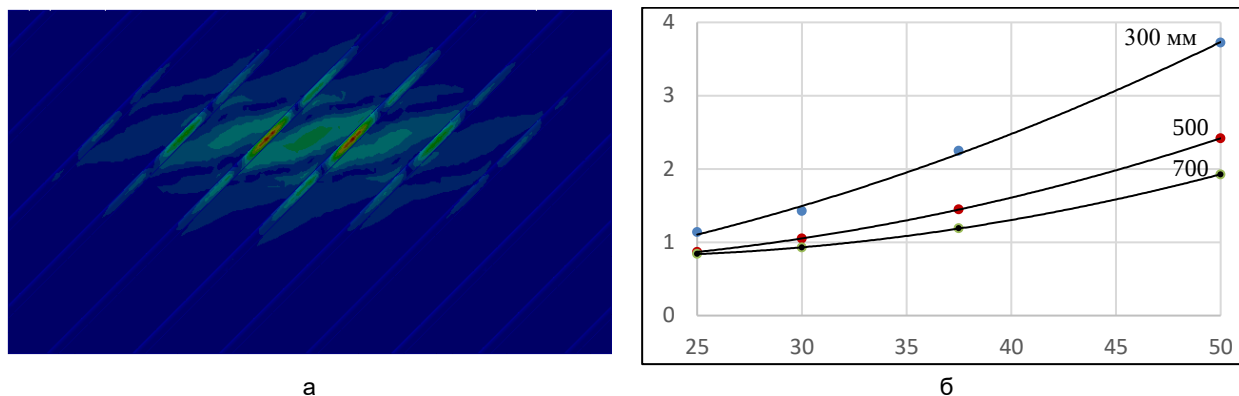


Рис. 4. Эпюры приведённых напряжений при интервале между полосами 700 мм по горизонтали (а) и снижение наибольших напряжений (повышение прочности) в зависимости от радиусов полос при разных интервалах (б) и угле 45 градусов

Fig. 4. Diagrams of the reduced stresses at the interval between the strips of 700 mm horizontally (a) and reduction of the greatest stresses (increase in strength) depending on the radii of the strips at different intervals (b) and an angle of 45 degrees

Аналитические оценки предельной прочности

Выше отмечались результаты работы [14], в которой предложен алгоритм оценки предельной прочности пластин с НЛУ под разными углами. На рис. 5 показаны фрагменты из этой работы. В ней рассмотрены сценарии возможного повреждения обшивки между полосами (типа «бухтина») и повреждения обшивки вместе с полосой НЛУ (типа «вмятина») (рис. 5а). Кроме анализа предельной прочности в работе была выполнена оценка эффективности НЛУ в зависимости от углов наклона полос (рис. 5б). Показано, что наибольшая эффективность усиления зависит от системы набора (поперечная или продольная) и достигается при разных углах положения НЛУ к горизонту.

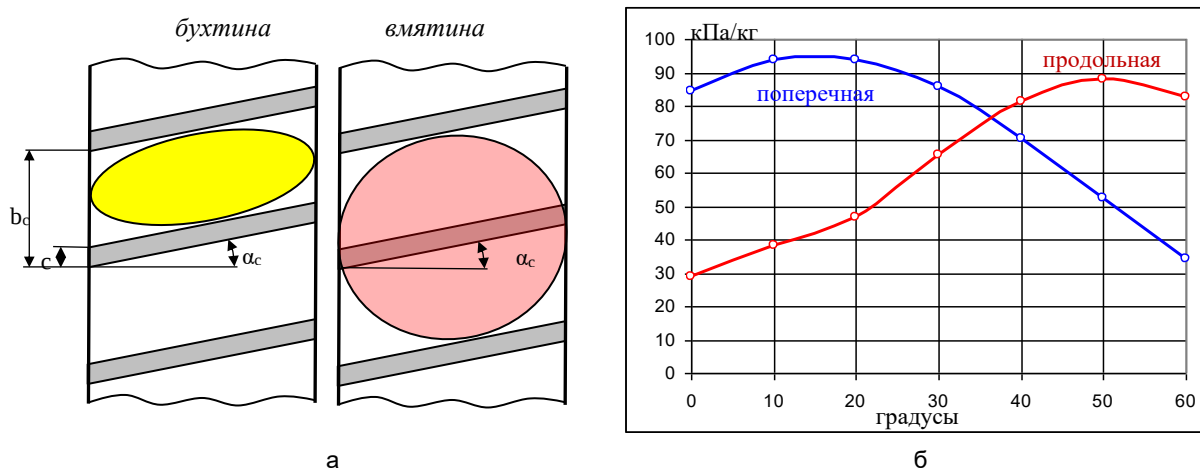


Рис. 5. Расчётные схемы пластин с НЛУ (а) и оценки эффективности (б) из работы [14]

Fig. 5. Calculation schemes of plates with EIR (a) and efficiency estimates (b) from work [14]

Для оценки эффективности НЛУ в работе [14] использован не совсем удачный критерий соотношения предельных давлений (прочности) и массы конструкции, имеющий размерность МПа/кг. Ниже вопрос эффективности будет рассмотрен отдельно. В данном случае интерес представляет возможность дополнительной оценки повышения предельной прочности за счёт НЛУ и её сравнение с результатами упругого анализа (рис. 6).

Сравнение показывает, что с позиции предельного пластического состояния эффект повышения прочности существенно больше. Однако анализ предельного состояния не выявляет отрицательных эффектов – возможного снижения прочности от применения НЛУ.

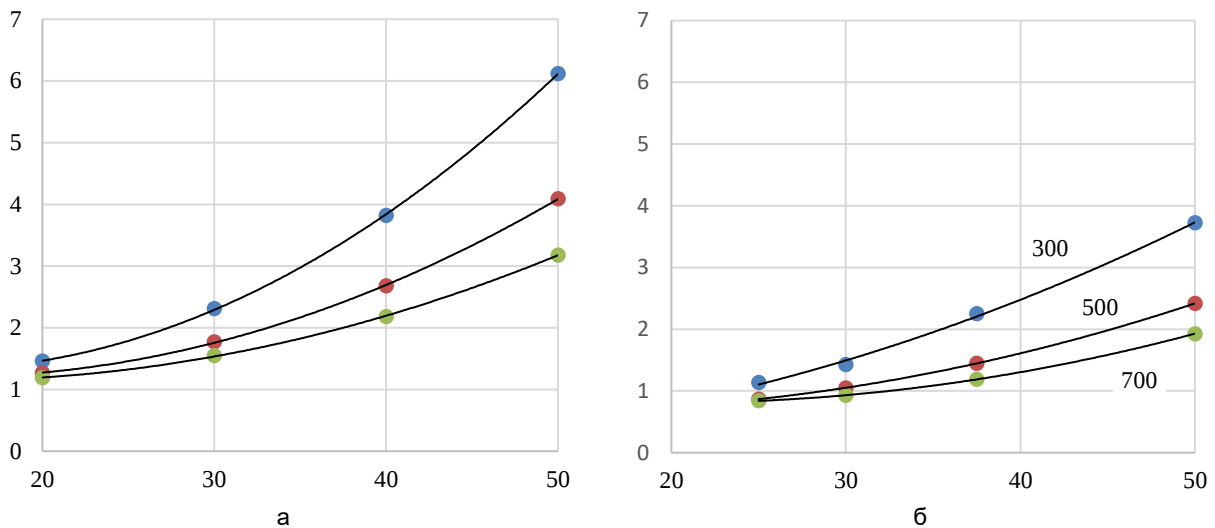
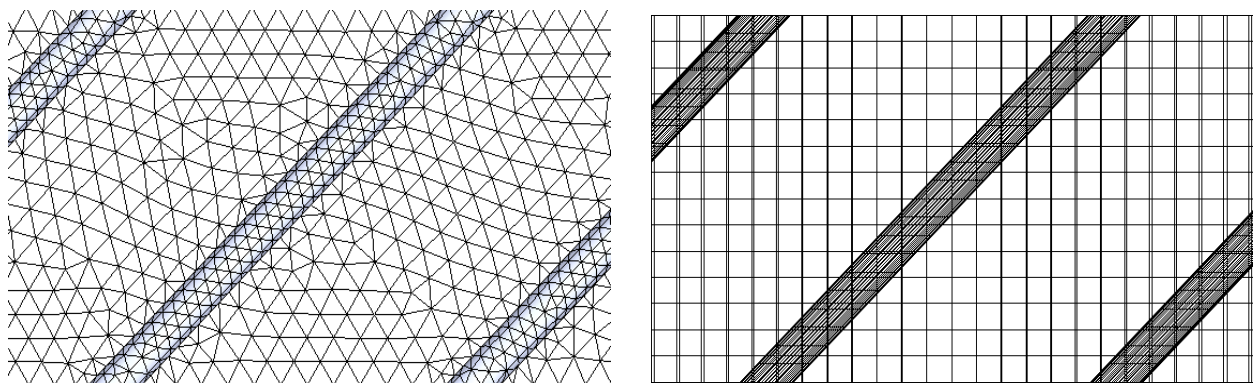


Рис. 6. Сравнение коэффициентов повышения прочности по предельному пластическому состоянию (а) и в упругой стадии работы (б) обшивки с НЛУ в зависимости от радиусов сечений полос (20–50 мм) и интервалов размещения (300, 500, 700 мм) при угле 45 градусов

Fig. 6. Comparison of the coefficients of strength increase in the limiting plastic state (a) and in the elastic stage of operation (b) of the lining with EIR depending on the radii of the strip sections (20–50 mm) and the placement intervals (300, 500, 700 mm) at an angle of 45 degrees

Анализ несущей способности в области больших прогибов

Работа обшивки с НЛУ в процессе длительной эксплуатации судов не может быть ограничена только упругой стадией или предельным пластическим состоянием. В результате износа и перегрузок неизбежны значительные остаточные прогибы. Величину допускаемых остаточных прогибов можно оценить как $1/20$ от меньшей стороны пластины. В данном случае это прогибы до 35 мм. Исследования работы моделей при больших прогибах выполнено в программах SolidWorks и ANSYS для возможности сравнений. При решении этой задачи были выявлены проблемы с моделями в ANSYS при использовании сетки с треугольными конечными элементами. В результате были использованы модели с разными сетками (рис. 7).



а) расчёт – 19 минут, прогиб – 53 мм
a) calculation of 19 minutes, deflection of 53 mm

б) расчёт – 30 минут, прогиб – 65 мм
b) calculation of 30 minutes, deflection of 65 mm

Рис. 7. Сравнение сеток конечных элементов в моделях SolidWorks (а) и ANSYS (б)

Fig. 7. Comparison of finite element grids in the SolidWorks (a) and ANSYS (b) models

Результаты расчётов и сравнения представлены на рис. 8. Несмотря на отличия сеток обе программы дают близкие решения (рис. 8а). Влияние НЛУ на прочность наиболее значительно в упругой стадии (повышение в 4 раза), при прогибах 10 мм почти 2-кратное, а с ростом прогибов до 35 мм снижается до 1,3 раза.

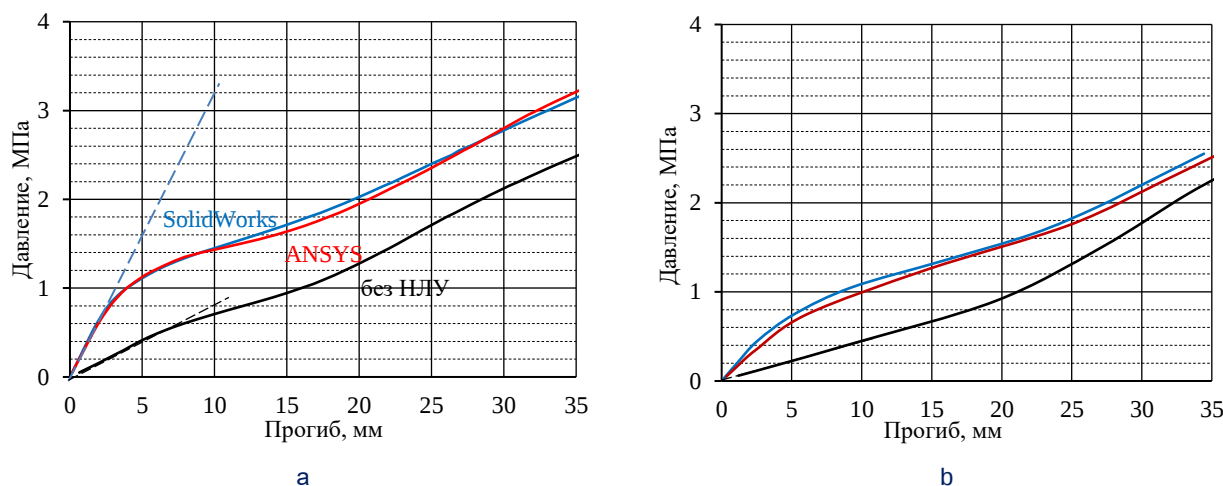


Рис. 8. Сравнения решений в разных программах (а) и при разных углах в SolidWorks (b) для радиуса полос 37,5 мм и интервала размещения 700 мм

Fig. 8. Comparisons of solutions in different programs (a) and at different angles in SolidWorks (b) for a strip radius of 37.5 mm and a placement interval of 700 mm

Модель изолированной пластины (рис. 8а) показывает большую жёсткость и прочность (примерно в 1,7 раза), чем модель из 4-х пластин (рис. 8b), благодаря близости и влиянию опорного контура. С ростом прогибов отличие снижается до 1,2 раза. Для практики следует рекомендовать модели с удалением опорного контура от границ зоны ледовых давлений.

Сравнительный анализ эффективности НЛУ

Кроме повышения прочности для практики проектирования НЛУ важны и критерии эффективности, так как заданному (желаемому) уровню прочности может соответствовать множество вариантов конструктивных решений. Для формирования такого критерия в безразмерном виде предлагается позитивный фактор – повышение прочности разместить в числителе, а негативный – рост массы разместить в знаменателе критерия. Тогда для условий упругого состояния в зависимости от напряжений критерий эффективности имеет вид:

$$f = \frac{1 - \sigma_1 / \sigma_0}{m_1 / m_0 - 1}, \quad (1)$$

где σ_1 – наибольшие приведённые напряжения в элементах конструкции с НЛУ;
 σ_0 – наибольшие приведённые напряжения в обшивке без НЛУ;
 m_1 – масса модели конструкции с НЛУ;
 m_0 – масса модели обшивки без НЛУ.

Аналогичный критерий для условий предельного пластического состояния можно представить в виде функции от расчётных предельных ледовых давлений (прочности):

$$f_0 = \frac{p_1 / p_0 - 1}{m_1 / m_0 - 1}, \quad (2)$$

где p_1 – максимум предельного давления для конструкции с НЛУ;
 p_0 – максимум предельного давления для обшивки без НЛУ.

Сравнения на основе критериев эффективности (1) и (2) представлены на рис. 9. Критерий (2) для предельного состояния всегда положительный, почти линейно нарастает с увеличением радиуса сечения полос и практически не зависит от интервала их размещения (рис. 9а). Критерий (1) имеет существенно меньшие значения со значительным влиянием как радиусов полос, так и интервалов размещения (рис. 9b). Кроме того, критерий (1) позволяет контролировать условие отрицательного эффекта – роста напряжений из-за НЛУ (значения менее 0).

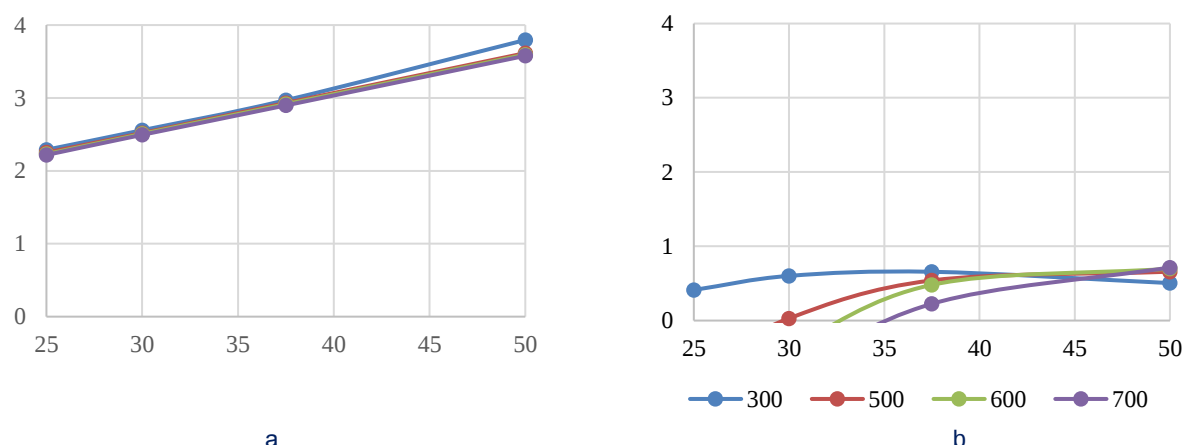


Рис. 9. Сравнения эффективностей конструктивных решений с НЛУ по условию предельной пластической прочности (а) и в упругой стадии работы (б) в функции от радиусов сечений полос в диапазоне 25–50 мм, при разных интервалах (300–700 мм) и для угла 45 градусов

Fig. 9. Comparisons of the efficiencies of EIR design solutions under the condition of maximum plastic strength (a) and in the elastic stage of operation (b) as a function of the radii of the strip sections in the range of 25–50 mm, at different intervals (300–700 mm) and for an angle of 45 degrees

С учётом выполненных сравнений критерий (1) представляется более чувствительным и важным для практики проектирования НЛУ, учитывая разнообразие условий длительной работы судов с возможностью появления усталостных и даже хрупких трещин в НЛУ при низких температурах.

На рис. 10 более укрупнённо дано сравнение при двух углах наклона полос НЛУ с разными радиусами сечений и интервалами размещений. Здесь видно, что зона отрицательных эффективностей смещается по шкале радиусов сечений полос, а их максимальные значения зависят от интервалов размещения.

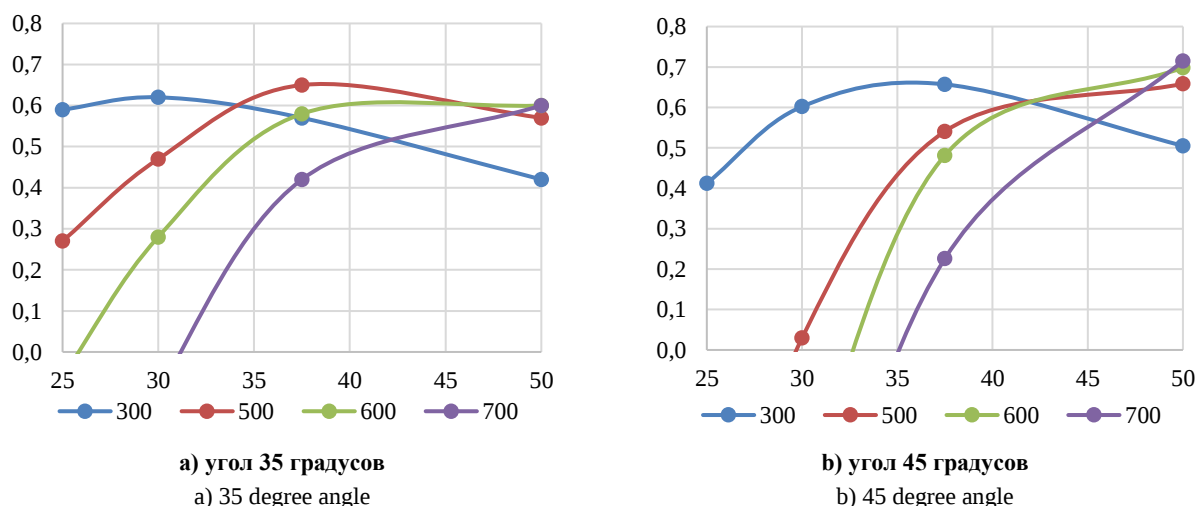


Рис. 10. Сравнения эффективностей НЛУ в упругой стадии при разных углах положения
Fig. 10. Comparisons of the efficiency of EIRs in the elastic stage at different angles of position

Представленные результаты и сравнения позволяют говорить о возможностях поиска и выбора оптимальных конструктивных решений при проектировании НЛУ в конкретных условиях. Такие задачи потребуют наложения ограничений, связанных не только с уходом от зоны отрицательных эффективностей, но и ограничений, связанных с запасами прочности бортового набора. Причина в том, что НЛУ не столь существенно влияют на прочность бортового набора и не исключают возможности его повреждений после реализации НЛУ.

Заключение

В работе рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с прямыми расчётами ледовой прочности судов и её повышением за счёт НЛУ. Отмечено, что для решения таких задач требуются не только параметры ледовой нагрузки, которые регламентируют Правила, но и форма её эпюры. В данном случае применялась пиковая эпюра давлений в виде треугольной призмы. Отмечен ряд возможных решений – от аналитических до численных – на базе МКЭ с различными условиями моделирования. Показаны возможности решения задачи на основе балочных моделей МКЭ с необходимостью уточнения концепции «присоединённых поясков». Однако приоритет предлагается отдавать пластинчатым моделям МКЭ, которые в более полной мере выявляют резервы прочности и специфику поведения связей при локальных ледовых давлениях. На основе таких моделей выполнены вариантные расчёты в двух программах с разными сетками КЭ как в упругой стадии, так и в области текучести с большими прогибами. Рассмотрены различные варианты конструктивных решений по НЛУ с разными радиусами сечений полос, интервалами размещения и углами положения к горизонту. Предложены критерии для оценки эффективности НЛУ. Выполнены сравнения разных решений по прочности и эффективности. Выявлены особенности для учёта в случае оптимизации НЛУ. Результаты работы вносят существенный вклад в методическое обеспечение практики применения НЛУ, которые пока не являются «эталонными» конструкциями [15]. Результаты могут использоваться для регламентации НЛУ, их проектирования в условиях судостроения и судоремонта.

Благодарности

Авторы выражают благодарность студентам Д.Н. Софроновой, А.И. Швецову и Нгуен Тунг Лам из группы М3123 Департамента морской техники и транспорта Политехнического института ДВФУ за помощь в проведении расчётов для вариантов конструктивных решений.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

С.В. Каленчук – расчёты и анализ прочности на балочных моделях; А.В. Котлярский – описание опыта проектирования и эксплуатации, расчёты прочности в среде Solidworks, перевод текста на английский язык; В.А. Кулеш – аналитические оценки прочности, сравнительный анализ эффективности, общий анализ результатов и заключение по работе; Хиеп Чунг Фам – расчёты прочности в среде ANSYS.

S.V. Kalenchuk – calculations and analysis of strength on beam models; A.V. Kotlyarsky – description of the design and operation experience, strength calculations in the Solidworks system, translation of the text into English; V.A. Kulesh – analytical strength assessments, comparative efficiency analysis, general analysis of results and conclusion on the work; Hiep Trung Pham – strength calculations in the ANSYS environment.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попов Ю.Н., Фадеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А. Прочность судов, плавающих во льдах. Судостроение. Ленинград, 1967. 224 с.
2. Курдюмов В.А., Тряскин В.Н., Хейсин Д.Е. Определение ледовой нагрузки и оценка ледовой прочности корпусов транспортных судов // Труды ЛКИ, сборник «Ледопроеходимость и ледовая прочность судов». Ленинград, 1979. С. 3–12.
3. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Копилец Н.Ф., Дидковский А.В. О проекте новой редакции требований Правил РМРС к ледовой прочности судов и ледоколов // Судостроение. 1997. № 5. С. 10–20.
4. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. Обеспечение ледовой прочности и безопасной эксплуатации судов в российских арктических и замерзающих морях на основе комплексной системы формирования принципиальных инженерных решений // Труды ЦНИИ Крылова. 2008. Вып. 39(323). С. 69–89.
5. Руководство по оценке напряжённо-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе МКЭ. НД № 2–030101–045. РМРС. СПб., 2021. 11 с.

6. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. РМРС. СПб., 2024.
7. Finite element analysis. Class guideline – DNVGL-CG-0127, 2015. 93 p.
8. Kulesh V.A., Kuteynikov M.A., Zhitnikov I.V. Solutions for ice strength of hulls of vessels in service // *Proceedings of the 24th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meetings on Marine Structures*. Vladivostok, 2010. P. 150–153.
9. Каленчук С.В., Кулеш В.А. Ледовая прочность корпусов морских судов. Этапы развития, проблемы и перспективы // *Вестник ДВГТУ*. 2010. № 3(5). С. 137–151.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII. РМРС, Дополнительные символы. СПб., 2023. 477 с.
11. Kulesh V.A. Improving operational reliability of ice reinforcements of vessels hulls // *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*. 2013. Vol. 3, № 1. P. 9–14.
12. Кулеш В.А., Огай С.А., Пец Н.Г. Проект ледовых усилений сухогрузного судна // *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. Т. 2, № 3(37). С. 64–70.
13. Кулеш В.А., Пец Н.Г., Приемкин А.В. Анализ опыта эксплуатации и эффективности наружных ледовых усилений корпуса // *Научно-технический сборник РМРС*. 2019. № 56/57. С. 84–93.
14. Кулеш В.А., Пец Н.Г. Эффективность наружных ледовых усилений с наклоном полос // *Морские интеллектуальные технологии*. 2020. Т. 2, № 1. С. 71–81.
15. Кузнецов Э.А., Кулеш В.А., Суров О.Э., Фам Ч.Х. Проблемы ледовой регламентации «не эталонных» конструкций // *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. № 3, ч. 3. С. 23–29.

REFERENCES

1. Popov Yu.N., Fadeev O.V., Heisin D.E., Yakovlev A.A. The strength of ships floating in ice. *Shipbuilding*. Leningrad, 1967. 224 p. (In Russ.).
2. Kurdyumov V.A., Tryaskin V.N., Heisin D.E. Determination of ice load and assessment of ice strength of hulls of transport vessels. *Proceedings of the LKI, collection "Ice Permeability and Ice Strength of Ships"*. Leningrad, 1979, pp. 3–12. (In Russ.).
3. Apollonov E.M., Nesterov A.B., Kopilets N.F., Didkovsky A.V. On the draft of a new edition of the requirements of the RMRS Rules for the ice strength of ships and icebreakers. *Shipbuilding*, 1997, no. 5, pp. 10–20. (In Russ.).
4. Apollonov E.M., Nesterov A.B., Timofeev O.Ya. Ensuring ice strength and safe operation of ships in the Russian Arctic and freezing seas based on an integrated system for the formation of fundamental engineering solutions. *Proceedings of the Krylov Central Research Institute*, 2008, vol. 39(323), pp. 69–89. (In Russ.).
5. Guidelines for assessing the stress-strain state of ship hull structures based on FEM. ND No. 2-030101-045. RMRS. St. Petersburg, 2021. 11 p. (In Russ.).
6. Rules for the classification and construction of naval vessels. Part II. Body. RMRS. St. Petersburg, 2024. (In Russ.).
7. Finite element analysis. Class guideline – DNVGL-CG-0127. 2015. 93 p.
8. Kulesh V.A., Kuteynikov M.A., Zhitnikov I.V. Solutions for ice strength of hulls of vessels in service. *Proceedings of the 24th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meetings on Marine Structures*, 2010, pp. 150–153.
9. Kalenchuk S.V., Kulesh V.A. Ice strength of hulls sea vessels. Stages of development, problems and prospects. *Bulletin of DVG TU*, 2010, no. 3(5), pp. 137–151. (In Russ.).
10. Rules of classification and construction of naval vessels. Part XVII. RMRS, Additional Symbols. St. Petersburg, 2023. 477 p. (In Russ.).
11. Kulesh V.A. Improving operational reliability of ice reinforcements of vessels hulls. *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*, 2013, vol. 3, no. 1, pp. 9–14. (In Russ.).
12. Kulesh V.A., Ogai S.A., Petz N.G. Project of ice reinforcements of a dry cargo vessel. *Marine Intelligent Technologies*, 2017, vol. 2, no. 3(37), p. 64–70. (In Russ.).
13. Kulesh V.A., Petz N.G., Priemkin A.V. Analysis of operational experience and effectiveness of external ice reinforcements of the hull. *Scientific and Technical Collection of the RMRS*, 2019, no. 56/57, pp. 84–93. (In Russ.).
14. Kulesh V.A., Petz N.G. Efficiency of external ice reinforcements with a strip slope. *Marine Intelligent Technologies*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 71–81. (In Russ.).
15. Kuznetsov E.A., Kulesh V.A., Surov O.E., Pham Ch.Kh. Problems of ice regulation "non-reference" structures. *Marine Intelligent Technologies*, 2023, no. 3, part 3, pp. 23–29. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Каленчук Сергей Всеволодович – кандидат технических наук, главный специалист, Дальневосточный центр судостроения и судоремонта (Владивосток, Российская Федерация),

✉ skalenchuk@mail.ru

Sergei V. Kalenchuk, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist, Far-Eastern Shipbuilding and Repair Center (Vladivostok, Russian Federation).

Котлярский Александр Витальевич – магистрант, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ kotliarskii.av@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8494-5614>

Alexander V. Kotlyarsky, Master's Student, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Кулеш Виктор Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Политехнический институт (Школа), Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ vkulesh@mail.com

Viktor A. Kulesh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Фам Чунг Хиен – кандидат технических наук, сотрудник, Исследовательский институт кораблестроения (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),

✉ phiepast07@gmail.com

Hiep Trung Pham, Candidate of Technical Sciences, Specialist, Shipbuilding Research Institute (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam).

Статья поступила в редакцию / Received: 23.01.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 28.02.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025

Научная статья

УДК 629.128

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/38-50>

Постановка и численное решение задачи оптимизации конструкций корпуса судна

Виктор Григорьевич Бугаев✉, Владислав Михайлович Кашаев,
Максим Владимирович Китаев

Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация

✉ bugaev.vg@dvfu.ru

Аннотация. В последнее время в России и за рубежом уделяют большое внимание цифровой экономике и предприятиям, ориентированным на внедрение концепции информационной поддержки жизненного цикла изделия, технологий управления жизненным циклом изделия и на численные методы решения проектных и технологических задач. Основное внимание в статье уделено моделированию изгибающих и скручивающих моментов, исследованию напряжённо-деформированного состояния корпуса судна как сложной пространственной конструкции переменного по длине сечения с учётом изгиба в горизонтальной и вертикальной плоскостях, стеснённого кручения корпуса, наличия двойного борта и двойного дна, продольных и поперечных переборок, вырезов люков. Приведены результаты определения элементов эквивалентного бруса и оптимизации конструкции корпуса на начальном этапе проектирования судна.

Ключевые слова: оптимизация, компьютерное моделирование, общая продольная прочность, кручение

Для цитирования: Бугаев В.Г., Кашаев В.М., Китаев М.В. Постановка и численное решение задачи оптимизации конструкций корпуса судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 38–50.

Original article

Formulation and numerical solution of the problem of optimization of ship hull structures

Viktor G. Bugaev✉, Vladislav M. Kashaev, Maksim V. Kitaev

Far Eastern Federal University,
Vladivostok, Russian Federation

✉ bugaev.vg@dvfu.ru

Abstract. Recently, Russia and abroad have been paying great attention to the digital economy and enterprises focused on the introduction of the concept of information support for the product life cycle, product life cycle management technologies and numerical methods for solving design and technological problems. The main attention in the article is paid to the modeling of bending and torsional moments, the study of the stress-strain state of the ship's hull as a complex spatial structure of variable section length, taking into account the bending in the horizontal and vertical planes, constrained torsion of the hull, the presence of a double side and a double bottom, longitudinal and transverse bulkheads, hatch cutouts. The results of determining the elements of an equivalent beam and optimizing the hull structure at the initial stage of ship design are presented.

Keywords: optimization, computer modeling, total longitudinal strength, torsion

For citation: Bugaev V.G., Kashaev V.M., Kitaev M.V. Formulation and numerical solution of the problem of optimization of ship hull structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 38–50. (In Russ.).

Введение

Внедрение цифровых технологий в судостроение предполагает наличие предприятий, оснащённых современным техническим и программным обеспечением, методическими материалами, описывающими технологию цифрового проектирования (3D-моделирования, инженерного анализа и технологической подготовки производства) судов и объектов морской техники, соответствующей нормативной базы. Особое место в этой цепочке занимают методы проектирования и сопровождения судов в течение их жизненного цикла.

В научной среде всё чаще рассматриваются проблемы и методы создания и использования цифровых двойников, отмечается их роль в управлении жизненным циклом изделий судостроения, необходимость совершенствования нормативно-правовой базы и требований соответствующих разделов правил классификационных обществ [1–3]. Отмечается, что методы, основанные на использовании данных судов-прототипов и статистических данных для новых объектов, оказываются мало применимы в связи с повышением требований к технологичности и, как следствие, снижением строительной стоимости судов, а также с появившейся возможностью использования типовых библиотек ранее созданных цифровых двойников, судового оборудования, комплектующих, элементов набора и других изделий [2–5].

При проектировании конструкций корпуса новых судов важным аспектом является моделирование нагрузок, действующих на корпус судна на волнении, а также оценка влияния отдельных элементов конструкций на прочность при общем продольном изгибе и кручении [3, 6–9]. Численные методы и цифровые технологии предоставляют широкие возможности для проведения исследований в этом направлении [4, 10, 11].

Рядом классификационных обществ разработаны и используются рекомендации для выполнения численного анализа мореходных качеств [8], общей продольной прочности [2] и мониторинга изменения технического состояния судовых конструкций с течением времени [1, 2, 11].

Цель исследования – численное решение задачи оптимизации конструкций корпуса судна с использованием информационных технологий проектирования и поддержки жизненного цикла.

Объект исследования – сухогрузное судно с широким раскрытием палубы.

Задача решается в два этапа:

Первый этап – определение элементов эквивалентного бруса (ЭБ) судна до оптимизации основных конструкций корпуса, набранных по Правилам Российского морского регистра судоходства (РМРС).

Второй этап – определение топологии и размеров связей конструкций корпуса X_k , при которых один из принятых критериев эффективности (материалоёмкость или себестоимость изготовления) достигает минимального значения и выполняются требования к конструкции, представленные в виде системы ограничений [4, 5, 12–14].

Известными величинами являются: характеристики и элементы судна, полученные на верхнем уровне проектирования, весовая нагрузка, параметры формы корпуса, компоновка; начальные параметры и элементы эквивалентного бруса (ЭБ) (площадь и момент инерции поперечного сечения, толщины верхней палубы, борта, днища, двойного дна и др.) (рис. 1b), форма и положение волновой ватерлинии и др. X^* (табл. 1) [12].

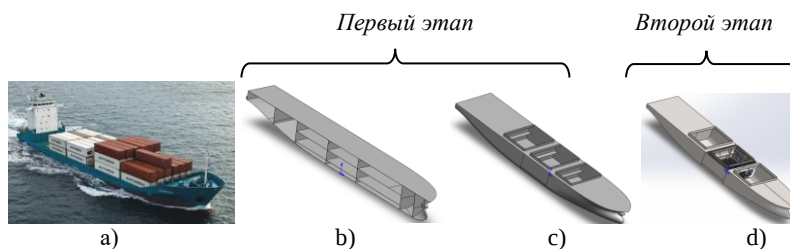


Рис. 1. Сухогрузное судно Холмогоры:

а) внешний вид судна; б) 3D-модель ЭБ без вырезов; в) 3D-модель ЭБ с вырезами; д) 3D-модель ЭБ с конструкциями корпуса в районе центрального трюма

Fig. 1. Dry cargo vessel Kholmogory:

a) appearance of the vessel; б) 3D model of the EB without cutouts; в) 3D model of the EB with cutouts; д) 3D model of the EB with hull structures in the area of the central hold

На основании этих данных создана 3D-модель корпуса судна (рис. 1с), а затем детальная 3D-модель конструкций центрального трюма в соответствии с требованиями Правил РМРС, равноценная по моменту инерции эквивалентному брусу для второго этапа (рис. 1d).

Таблица 1/ Table 1

Исходная информация для моделирования

Background information for modeling

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Параметры	L, м	B, м	T, м	H, м	D, т	DW, т	v, уз	$P_{ко}(P_i)$, т	$l_1(l_i)$, м	b_o , м
2	Значения	60,0	15,5	4,0	6,0	2800	1830	16,0	710	12,8	13,65

Здесь и далее L – длина между перпендикулярами, B – ширина, T – осадка, H – высота борта, D – водоизмещение, DW – дедвейт, v – расчётная скорость; $P_{ко}(P_i)$ – масса основного корпуса (i-го раздела нагрузки: оборудования; устройств; систем и др.); $l_1(l_i)$ – длина центрального трюма (i-го отсека); b_o – ширина трюма (люка). Начальное отношение $H/B = 0,387$, $b_o/B = 0,88$.

Оптимизируемые переменные X_k :

Первый этап:

$S_1, S_2, S_3, S_4, \dots$ – толщины элементов эквивалентного бруса, верхней палубы (стрингера, угловых листов люков), борта (ширстрека), днища, двойного борта и двойного дна, поперечных переборок, комингсов люков, мм;

b_o, h_d – ширина люка (или двойного борта), высота двойного дна, м.

Второй этап:

a – шпация поперечного набора, мм;

n_1, n_2 – размеры бимсов и шпангоутов;

k_1, k_2 – количество усиленных продольных балок и поперечных рам набора, ед.;

s_1, s_2, s_3, s_4 – толщины палубной, бортовой и днищевой обшивок, толщина флоров, мм; топология (количество бортовых стрингеров и диафрагм).

Критерий эффективности:

Первый этап:

- минимум массы ЭБ

$$f_k(X^*, X_k) \rightarrow \min M(X^*, s, b_o, h_d), \quad (1)$$

Второй этап:

- минимум массы корпуса судна

$$f_k(X^*, X_k) \rightarrow \min M(X^*, a, n, k, s), \quad (2)$$

или

- минимум себестоимости изготовления конструкций корпуса

$$f_k(X^*, X_k) \rightarrow \min C_{пр}(X^*, a, n, k, s). \quad (3)$$

При определении размеров конструктивных элементов ЭБ и корпуса судна рассмотрен вариант загрузки при максимальной осадке. Балластное состояние и специальные случаи загрузки в настоящей работе не рассматриваются.

Ограничения определяют область допустимых решений и отражают требования Правил РМРС. Наряду с вектором оптимизируемых переменных и критерием эффективности они во многом определяют структуру и параметрические связи создаваемой 3D-модели.

3D-модель конструкций корпуса представляет собой совокупность трёхмерных моделей отдельных элементов и подсистем, объединённых параметрическими и ассоциативными взаимосвязями. В качестве подсистем в контексте сборки выступают палубное перекрытие (с вырезами и без вырезов), бортовое перекрытие (включая двойной борт), днищевое перекрытие, продольные и поперечные переборки. Любая подсистема может быть использована для

инженерного анализа – решения локальных задач с целью принятия решений о целесообразности внесения изменений в конструкции с учётом локальных нагрузок.

На первом этапе исследования создана судовая поверхность и элементы ЭБ (двойные борта и двойное дно, перемычки между люками) с целью увеличения крутильной жёсткости, испытывающие общий изгиб и кручение под действием сил веса и поддержания воды.

На втором этапе исследования в районе центрального трюма установлены конструкции корпуса, сохраняющие топологию эквивалентного бруса и параметры его поперечного сечения.

Таким образом, модель позволяет решать задачи стеснённого кручения корпуса судна переменного сечения и изгиба в горизонтальной и вертикальной плоскостях с учётом влияния на общую прочность двойного борта и дна, продольных и поперечных переборок, вырезов, комингсов и межлюковых перемычек.

Нагрузка. Изгибающие моменты и перерезывающие силы на тихой воде и на волнении моделируются посредством приложения весовой нагрузки (как для реально возможных в эксплуатации случаев распределения нагрузки) и сил поддержания к корпусу судна. Вес конструкций корпуса, устройств, энергетической установки, цистерн запаса СПГ и т.п., вошедших в 3D-модель, рассчитывается с учётом заданного материала и библиотечных элементов. Конструкции, оборудование и переменные грузы, не вошедшие в 3D-модель, моделируются в исследовании заданием сосредоточенных и распределённых сил в местах их расположения.

Нагрузка от запаса СПГ для газомоторных судов в случае оснащения их контейнер-цистернами можно считать сосредоточенной как для стандартного 40-фт контейнера (с учётом массы цистерны с запасом СПГ). Однако при установке танка СПГ в кормовой части судна нагрузка от него будет иметь более выраженное влияние на общую продольную прочность. Это влияние обуславливается сосредоточенным действием нагрузки и приложением её на малом расстоянии от транца в районе кормового подзора, зачастую выходящем из воды при статической постановке судна на волну, что необходимо также учесть в расчёте.

При постановке судна на косую волну создаются вертикальный, горизонтальный и скручивающий моменты. Величина усилий со стороны моря, действующих на корпус судна, зависит от формы корпуса, длины и ширины судна, от длины волны и курса судна относительно направления движения волн.

Наибольший изгибающий момент от общего кручения и наибольший изгибающий момент от общего продольного изгиба возникают при разных длинах волн. В то же время напряжения, вызываемые крутящим моментом, суммируются с напряжениями от общего продольного изгиба в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Этот факт необходимо учитывать при задании нагрузки, действующей на корпус судна, и выполнении расчётов по обеспечению прочности при кручении и общем изгибе.

Принято считать, что в момент времени, когда крутящий момент достигает максимальной величины, крен и качка судна отсутствуют, а усилиями, которые вызываются бортовой качкой, можно пренебречь.

Изгибающие моменты на вершине волны значительно превышают таковые на подошве волны, поскольку на подошве волны силы поддержания распределены более равномерно по длине судна, поэтому в настоящей работе особое внимание уделено исследованию прочности корпуса судна на вершине волны и при постановке на косую волну (рис. 2).

На нерегулярном волнении кручение и общий изгиб корпуса имеют сложный характер, требуют приложения хаотично изменяющихся во времени сил поддержания и поиск момента, когда напряжения в конструкциях будут максимальны, что в настоящее время трудно реализуемо. Наиболее опасным с точки зрения кручения корпуса является плавание судна на регулярном волнении при его движении под углом к направлению действия волн.

Крепление модели осуществлялось фиксированными шарнирами на сферических или цилиндрических гранях в зависимости от формы изгиба [12].

Сетка переменных размеров, строилась с учётом кривизны обводов и в зависимости от размеров деталей и типа исследования.

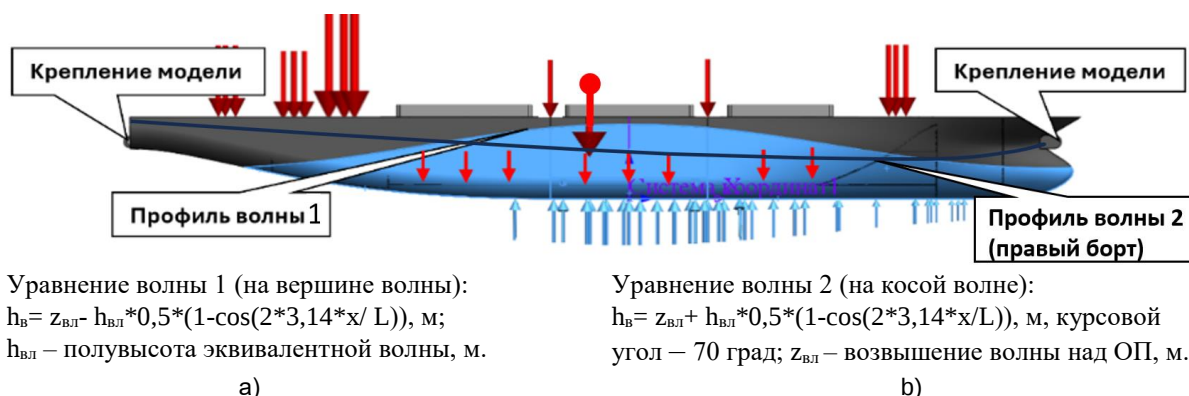


Рис. 2. Посадка судна:
 а) на вершине волны; б) на косой волне

Fig. 2. Landing the vessel:
 а) on top of the wave; б) on an oblique wave

Результаты решения задачи:

- характеристики поперечного сечения корпуса (ЭБ) и его элементов: площади; моменты сопротивления и инерции относительно нейтральных осей (у центра);
- характеристики напряжённо-деформированного состояния (НДС): нормальные и касательные (сдвиговые) напряжения; главные напряжения; результирующие напряжения по Мизесу; перемещения и деформации;
- показатели качества конструкций корпуса (ЭБ).

На рис. 3 и 4 представлены результаты расчётов напряжённо-деформированного состояния для начального варианта (до оптимизации) корпуса судна ($b_0/B=0,88$), как тонкостенной коробчатой балки переменного сечения, на вершине волны и на косой волне. На рис. 3 – эпюры нормальных напряжений SX в обшивке бортового перекрытия в районе центрального трюма, на рис. 4 – графики распределения узловых нормальных напряжений SX и напряжений по Мизесу (von Mises) по высоте борта.

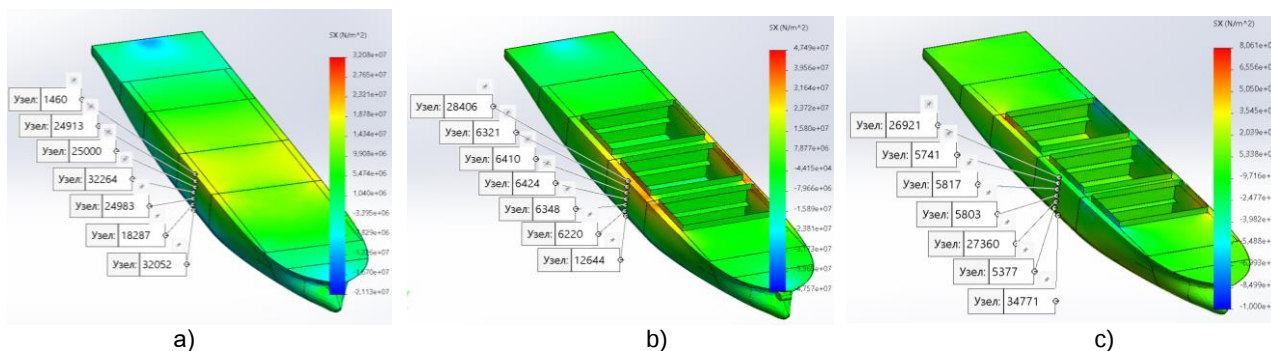


Рис. 3. Эпюры нормальных напряжений в обшивке бортового перекрытия:
 а) на вершине волны без вырезов; б) на вершине волны с вырезами; в) на косой волне с вырезами

Fig. 3. Diagrams of normal stresses in the hull lining:
 а) at the top of the wave without cutouts; б) at the top of the wave with cutouts;
 в) on an oblique wave with cutouts

Напряжения по Мизесу, возникающие в бортовой обшивке (рис. 4б) на косой волне, много превышают таковые при общем продольном изгибе на вершине волны, поскольку в этом случае суммируются напряжения от изгибающих моментов в вертикальной и горизонтальной плоскостях и стеснённого кручения. С другой стороны, максимальные изгибающие моменты возникают при различных длинах волн. Напряжения от стеснённого кручения сравнительно невелики, но могут оказывать заметное влияние на прочность корпуса при их суммировании с напряжениями от общих изгибающих моментов.

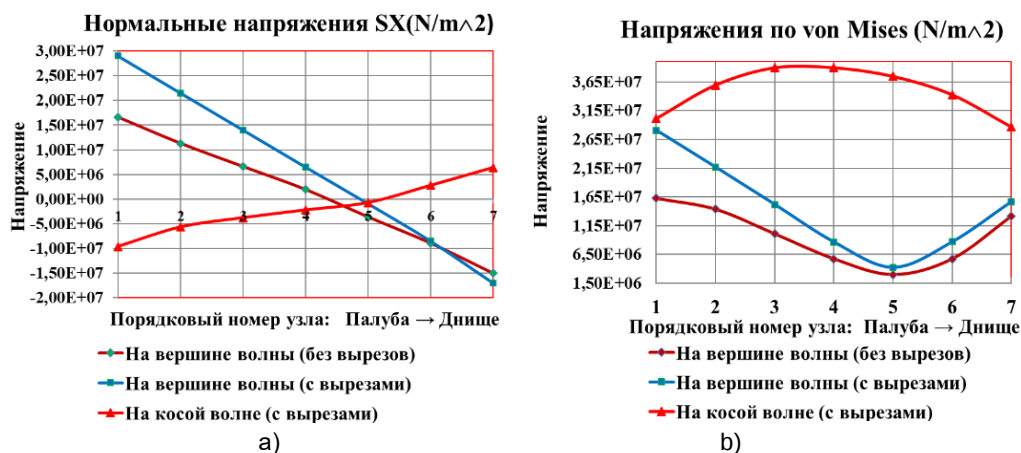


Рис. 4. Напряжения в обшивке бортового перекрытия:
а) нормальные напряжения SX; б) напряжения von Mises

Fig. 4. Stresses in the hull lining:

а) normal stresses SX; б) stresses von Mises

На рис. 5, 6 приведены зависимости нормальных напряжений SX (рис. 5) и напряжений по Мизесу (von Mises) (рис. 6) на косой волне в обшивке палубного перекрытия по ширине судна в районе поперечной переборки, поперечного комингса люка и в середине выреза, а на рис. 7 – по длине судна в районе соединения палубы со вторым бортом.

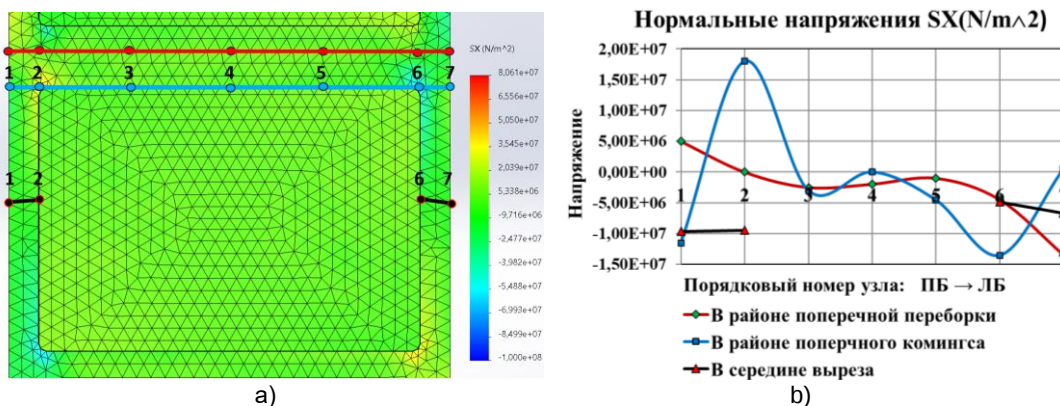


Рис. 5. Нормальные напряжения SX в обшивке палубного перекрытия на косой волне:
а) эпюра напряжений; б) распределение напряжений

Fig. 5. Normal SX stresses in the deck floor skin on an oblique wave:

а) stress diagram; б) stress distribution

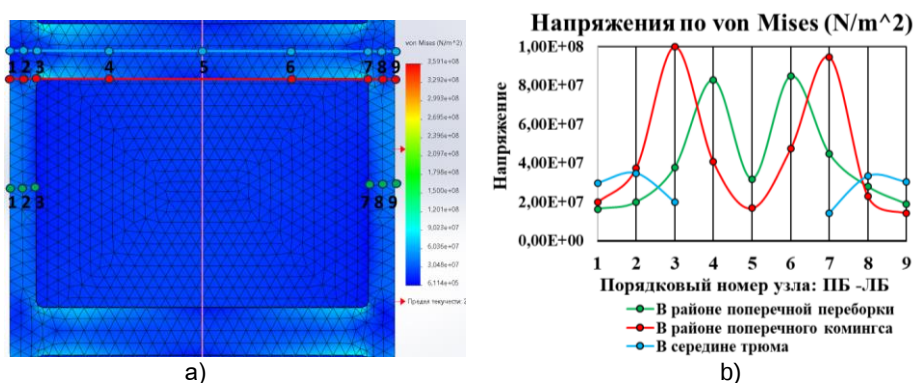


Рис. 6. Напряжения по Мизесу в обшивке палубного перекрытия на косой волне:
а) эпюра напряжений; б) распределение напряжений

Fig. 6. Mises stresses in the plating of the deck floor on an oblique wave:

а) stress diagram; б) stress distribution

Наибольшие нормальные напряжения S_X (рис. 5b) в обшивке палубного перекрытия в районе поперечного комингса на косой волне изменяются от -12,5 МПа у борта до +18,5 МПа в углу люка (узлы 1 и 2), средняя часть палубы менее загружена (узлы 3, 4, 5), левый борт загружен аналогично правому, но с противоположным знаком – от -14,0 МПа в углу люка до +0,5 МПа у борта (узлы 6 и 7). При этом палуба в средней части корпуса судна с точки зрения теории Мизеса (напряжения по Мизесу) загружена практически симметрично относительно ДП (рис. 6b).

Предлагаемый подход и 3D-модель конструкций корпуса (ЭБ) позволяет установить влияние элементов ЭБ, степени раскрытия палубы, длины трюма, ширины и высоты борта судна на величину наибольших напряжений и перемещений в различных районах корпуса, что расширяет преимущества оптимизации и детального анализа результатов исследований.

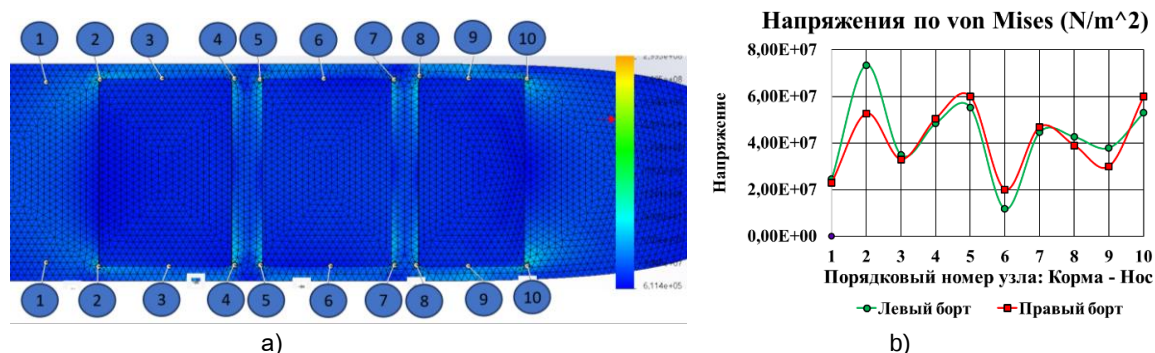


Рис. 7. Напряжения по Мизесу в обшивке палубного перекрытия на косой волне ($bo/B=0,88$): а) эпюра напряжений; б) распределение напряжений в районе борта

Fig. 7. Mises stresses in the plating of the deck floor on an oblique wave ($bo/B=0,88$): a) diagram of stresses on the grid; b) distribution of stresses in the area of the board

Для примера, на рис. 8 приведена зависимость напряжений по Мизесу в обшивке ЭБ от степени раскрытия палубы (ширины двойного борта) ($bo/B=0,88$; 0,75; 0,65), на рис. 8а – по контуру обшивки (палуба – борт – днище) в середине центрального трюма, на рис. 8б – по длине судна в районе продольного комингса правого борта. Заметно влияние степени раскрытия палубы на НДС в районе палубы и верхней части борта и менее заметно в районе днища, что говорит о необходимости обратить внимание, с одной стороны, на обеспечение равной прочности конструкций палубы и днища, а с другой стороны, на изменение нагрузки и, соответственно, сил поддержания (положение волны по отношению к корпусу судна).

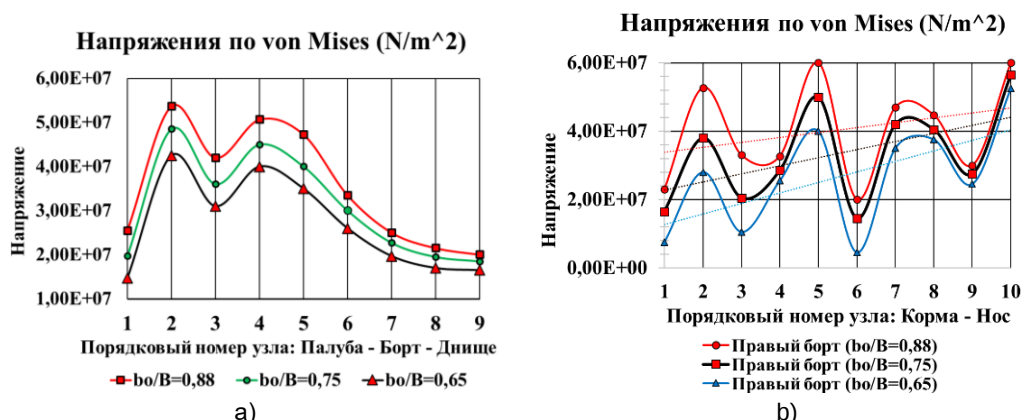


Рис. 8. Зависимость напряжений по Мизесу от степени раскрытия палубы (bo/B): а) по контуру обшивки (палуба – борт – днище) в середине центрального трюма; б) по длине судна в районе продольного комингса

Fig. 8. Dependence of Mises stresses on the degree of deck opening (bo/B): a) along the contour of the plating (deck – side – bottom) in the middle of the central hold; b) along the length of the vessel in the area of the longitudinal coaming

Оптимизация ЭБ. Задача оптимизации решается по критерию минимума массы (1) для судна с раскрытием палубы $b_0/B=0,75$. В качестве ограничений приняты напряжения по Мизесу в пределах 50–100 МПа во всех элементах ЭБ для получения равнопрочной конструкции.

Для определения элементов ЭБ в наиболее напряжённых его участках установлены датчики напряжений и перемещений, позволяющие контролировать напряжённо-деформированное состояние в этих районах. На рисунке 9 приведена предлагаемая схема расположения датчиков и начальные значения напряжений по Мизесу в районе расположения датчиков до оптимизации. В процессе выполнения расчётов датчики можно включить/отключить или установить новые в зависимости от их необходимости.

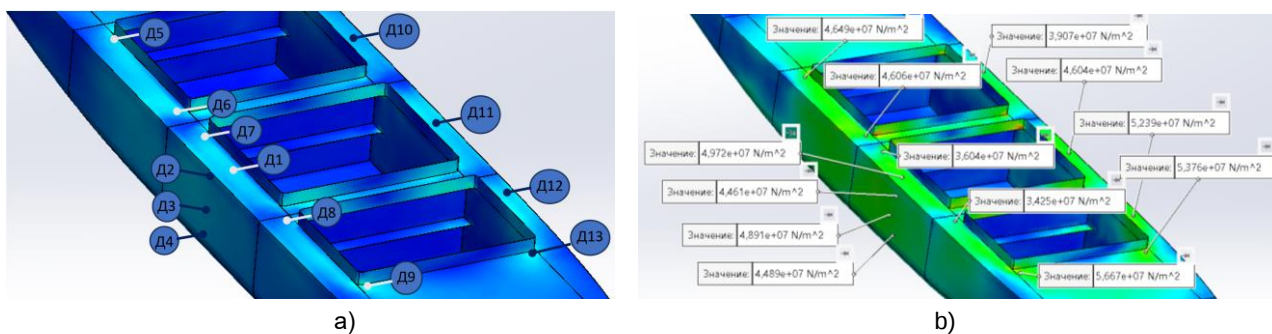


Рис. 9. Схема расположения датчиков:

а) предлагаемая схема; б) начальные значения напряжений до оптимизации ($b_0/B=0,75$)

Fig. 9. Sensor layout: a) the proposed scheme; b) initial values of stresses before optimization ($b_0/B=0,75$)

На рис. 10а приведены эпюра напряжений и расположение узлов, в которых определены напряжения, а также график распределения напряжений по контуру отсека (палуба, борт, скула, днище) до и после оптимизации.

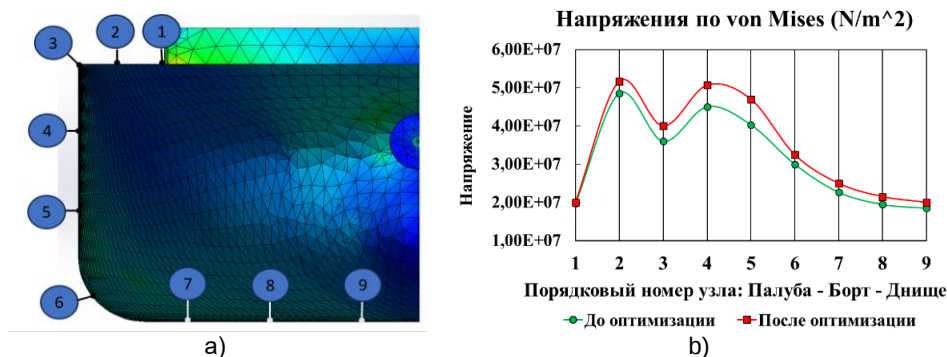


Рис. 10. Результаты оптимизации корпуса судна (ЭБ) ($b_0/B=0,75$):

а) эпюра напряжений по Мизесу в обшивке на косой волне; б) график распределения напряжений в обшивке палубы, борта, скулы и днища до и после оптимизации

Fig. 10. Results of hull optimization (EB) ($b_0/B=0,75$):

a) diagram of stresses according to Mises in the skin on an oblique wave; b) a graph of stress distribution in the deck, side, bilge and bottom plating before and after optimization

Поскольку наиболее напряжённым местом при любом виде изгиба корпуса судна является район угла выреза люка, а величина напряжений зависит от относительных размеров судна и люков (H/B , b_0/B), ширины поперечной перемычки, наличия и размеров двойного борта и двойного дна, в 3D-модель конструкций корпуса дополнительно введены угловые листы люков, двойной борт и двойное дно различной топологии.

На рис. 12 приведены 3D-модели ЭБ и конструкций корпуса в районе центрального трюма и таблица характеристик поперечного сечения корпуса. Возможные варианты конструктивных решений двойного борта представлены на рис. 13, аналогичные решения предусмотрены и для двойного дна.

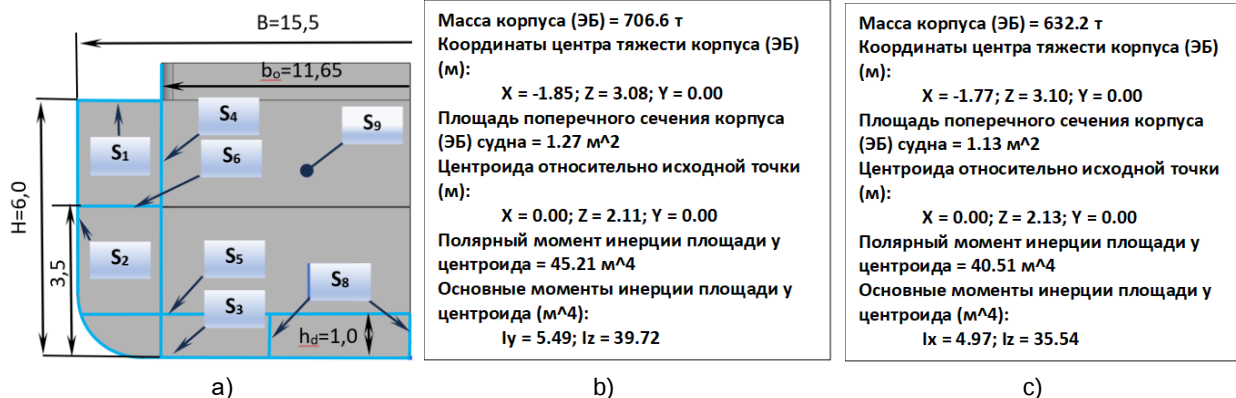


Рис. 11. Характеристики эквивалентного бруса:
а) основные элементы в районе центрального трюма; б) масса и характеристики поперечного сечения ЭБ до оптимизации; в) после оптимизации

Fig. 11. Characteristics of an equivalent beam:
a) main elements in the area of the central hold; б) the mass and cross-sectional characteristics of the EB before optimization; в) after optimization

Масса отсека центрального трюма от переборки до переборки (рис. 12а) после оптимизации ЭБ составляет 157,4 т, масса начального варианта (до оптимизации) реальных конструкций центрального трюма (рис. 12б), набранных по Правилам РМРС, – 160,77 т, а характеристики поперечного сечения (рис. 12с): z_g=2,19 м; x_s=1,77 м; I_y=4,11 м⁴; I_z=34,52 м⁴.

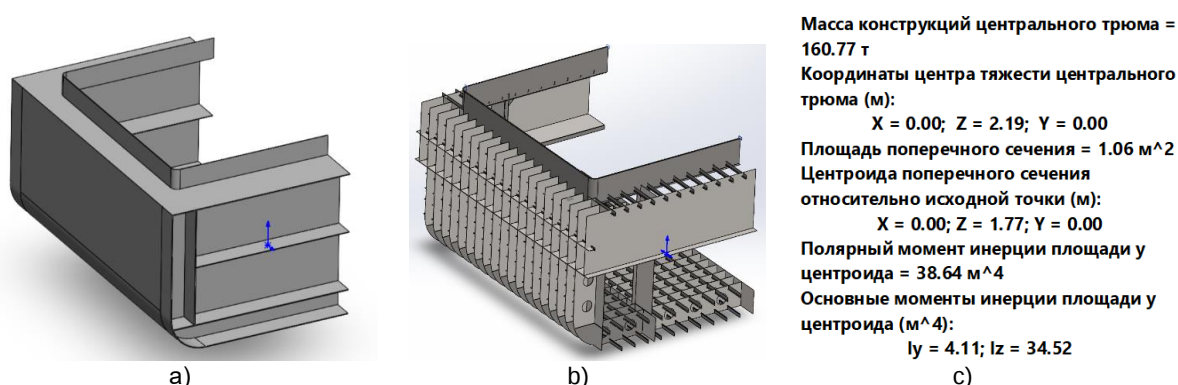


Рис. 12. 3D-модель центрального трюма:
а) эквивалентный брус (по ДП); б) реальные конструкции (по ДП); в) характеристики поперечного сечения в районе выреза

Fig. 12. 3D model of the central hold: а) equivalent beam; б) real structures; в) characteristics of the cross-section in area of the cutout

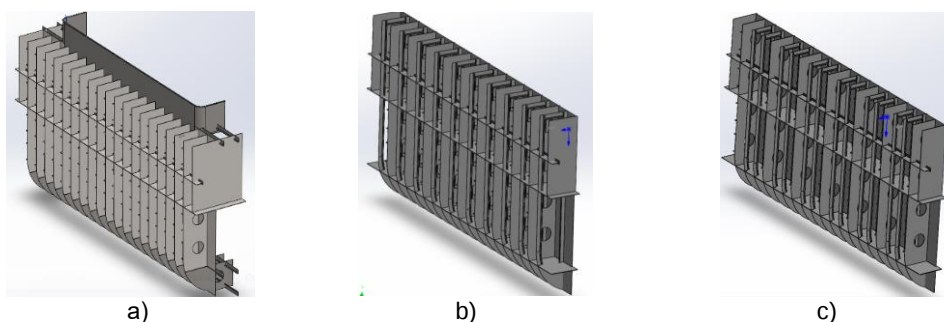


Рис. 13. Возможные конструктивные решения:
а) диафрагма на каждом шпангоуте; б) диафрагма через шпацию; в) диафрагма через две шпации

Fig. 13. Possible design options:
а) diaphragm at each frame; б) diaphragm through spacing; в) diaphragm through two spaces

Дальнейшие исследования направлены на оптимизацию и оценку НДС конструкций корпуса сухогрузных судов с широким раскрытием палубы и протяжёнными трюмами (паромов), в которых выделены три типа анализа: глобальный, частичный и локальный [2].

Глобальный анализ – оптимизация и оценка НДС всего корпуса судна (включающего основные элементы корпуса судна без учёта мелких деталей), находящегося под действием сил веса и поддержания воды, вызывающих общий изгиб и стеснённое кручение корпуса (рис. 14а).

Частичный анализ – оптимизация и оценка отдельных частей корпуса судна, 3D-модели которых содержат в дополнение к конструкциям для глобального анализа элементы основного набора, соизмеримые с размерами конечных элементов. Конструкции находятся под воздействием сил веса, поддержания и специфических нагрузок, размещённых внутри корпуса (рис. 14б).

Локальный анализ – оптимизация и оценка отдельных участков конструкций с концентраторами напряжений. В 3D-модели дополнительно создаются, если не были созданы ранее, полки и фланцы книц и бракет, срезки «на ус», все отверстия и вырезы, сварные швы (рис. 14с).

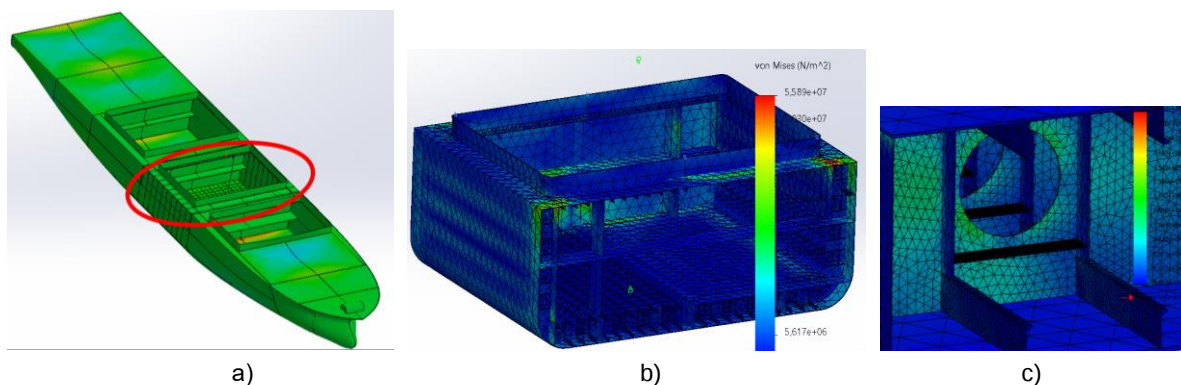


Рис. 14. Результаты анализа конструкций корпуса (напряжения по Мизесу): а) глобальный; б) частичный; в) локальный.

Fig. 14. Results of the analysis of hull structures (Mises stresses):
a) global; b) partial; c) local.

Выводы

Предлагаемый подход к оптимизационному проектированию судовых корпусных конструкций с использованием современных информационных технологий на ранней стадии проектирования судна позволяет определить топологию и размеры элементов поперечного сечения эквивалентного бруса в любом районе. Оптимизация конструкций корпуса, наряду с оптимизацией других подсистем судна с системных позиций, позволяет по-новому смотреть на процесс проектирования и сопровождения судна на всех этапах жизненного цикла.

Суммарные напряжения (по Мизесу), возникающие в палубных и днищевых связях при одновременном действии на корпус судна крутящего, вертикального и горизонтального изгибающих моментов на косой волне, превышают напряжения на вершине волны, что во многом зависит от соотношения между моментами сопротивления поперечного сечения корпуса относительно горизонтальной и вертикальной нейтральных осей.

Следует отметить, что данные выводы можно сделать применительно к рассматриваемым объектам исследования, однако методический подход приемлем для судов различных размеров и назначений.

Заключение

Цифровизация судостроительной промышленности, процессов проектирования и постройки судов приводит к необходимости использования 3D-моделирования и систем числен-

ного анализа на отечественных предприятиях, и одновременно с этим, требует обязательного внесения изменений в нормативно-правовые документы, включая Правила РМРС.

В статье рассмотрены основные принципы оптимизации конструкций корпуса, формирования моделей и решения задач инженерного анализа, сформулированы предложения по совершенствованию использованных моделей и развитию методов проектирования конструкций с учётом особенностей формы корпуса и конструктивных (топологических) решений. Наряду с оптимизацией конструкций корпуса с позиций общей продольной прочности, созданные модели и проиллюстрированный в настоящем исследовании подход позволяют решать частные задачи, связанные с обеспечением местной прочности, устойчивости, надёжности и технологичности отдельных конструкций.

Сдерживающими факторами в развитии данного направления в отечественной практике проектирования судов являются: отсутствие качественного отечественного программного обеспечения высокого уровня, недостаточность нормативной базы, регламентирующей внедрение цифровых технологий в судостроение.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.Г. Бугаев – постановка задачи, разработка методов исследования, создание 3D-модели, выполнение расчётов, анализ результатов; В.М. Кашаев – анализ отечественных и зарубежных источников, выполнение расчётов, анализ результатов, оформление; М.В. Китаев – разработка модели оптимизации характеристик и элементов судна и подсистем, выполнение расчётов, анализ результатов исследований.

V.G. Bugaev – problem statement, development of research methods, creation of a 3D model, calculations, analysis of results; V.M. Kashaev – analysis of domestic and foreign sources, calculations, analysis of results, design; M.V. Kitaev – development of a model for optimizing the characteristics and elements of the vessel and subsystems, performing calculations, analyzing the results of research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Агеев А.Б. Разработка и применение цифровых двойников в судостроении и кораблестроении // Труды XX международной научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении–2019», Санкт-Петербург, 10 июля 2019 г. Санкт-Петербург: Маринконф, 2019. С. 9–14.
2. Петров А.А., Морозова Е.А., Соклаков А.В., Суворов В.А. Разработка руководства РС по оценке напряжённо-деформированного состояния судовых конструкций методом конечных элементов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2020. № 60/61. С. 75–83. EDN: KBSMFN
3. Чижиумов С.Д., Немов А.С., Бурменский А.Д., Тарануха Н.А., Боровков А.И. Принципы и структурная модель разработки цифрового двойника корпуса судна // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 2, № 2. С. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.047>
4. Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг. Обеспечение прочности корпуса рыболовного судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2019. № 2(39). С. 49–56. DOI: <https://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-6>
5. Бугаев В.Г., Бондаренко Ю.В., Дам Ван Тунг, Ковалев А.А. Оптимизация конструкций корпуса судна с учётом их технологичности // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 1(54). С. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-1/38-49>
6. Тряскин В.Н. Методология параметрического проектирования конструкций корпуса судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск 2. С. 9–14. EDN: YQZQNJ
7. Тряскин В.Н., Юй Синьянь. Методика оценки характеристик поперечного сечения корпуса крупнотоннажного контейнеровоза на ранних стадиях проектирования судовых корпусных конструкций // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2, № 3(45). С. 87–92. EDN: JYUHEK
8. Faltinsen O.M. Challenges in hydrodynamics of ships and ocean structures // Brodogradnja. 2007.

- Vol. 58. № 3. P. 268–277. URL: <https://hrcak.srce.hr/16590>
9. Новиков В.В., Турмов Г.П., Суров О.Э., Герман А.П., Молоков К.А., Китаев М.В. Повреждения и расчётный анализ прочности корабельных конструкций: монография / науч. ред. Г.Ю. Илларионов. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2020. 266 с. ISBN 978-5-7444-4735-9
 10. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 1(391). С. 95–108. EDN: CTELQW
 11. Плотников К.В., Тряскин В.Н. Постановка и решение задачи проектирования поперечных танкерных рам в грузовой части крупнотоннажных нефтеналивных судов с использованием аппарата аппроксимации метода планирования эксперимента // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2, № 3(45). С. 93–100. EDN: CMJYDD
 12. Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг, Китаев М.В., Новиков В.В. К оптимизации формы и конструкций корпуса судна с системных позиций // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 4(57). С. 24–38. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/24-38>
 13. Gordo J.M., Leal M. A tool for analysis of costs on the manufacturing of the hull // Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources. London: Taylor & Francis Group, 2018. P. 743–748.
 14. Leal M., Gordo J.M. Hull's manufacturing cost structure // Brodogradnja. 2017. Vol. 68, № 3. DOI: <https://dx.doi.org/10.21278/brod68301>

REFERENCES

1. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Ageev A.B. Development and application of digital twins in shipbuilding and shipbuilding. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference Morintech-Practic “Information Technologies in Shipbuilding–2019”, St. Petersburg, July 10, 2019. Saint Petersburg, Morinconf Publ., 2019, pp. 9–14. (In Russ.).
2. Petrov A.A., Morozova E.A., Soklakov A.V., Suvorov V.A. Development of RS Guidelines for the assessment of the stress-strain state of ship structures by the finite element method. *Scientific and Technical Collection of the Russian Maritime Register of Shipping*, 2020, no. 60–61, pp. 75–83. (In Russ.).
3. Chizhiumov S.D., Nemov A.S., Burmenskiy A.D., Taranukha N.A., Borovkov A.I. Principles and framework model for the development of a ship hull digital twin. *Marine intellectual technologies*, 2021, vol. 2, no. 2(52), pp. 18–27. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.047>
4. Bugaev V.G., Dam Van Tung. Ensuring the strength of the fishing vessel hull. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2019, no. 2(39), pp. 49–56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-6>
5. Bugaev V., Bondarenko Yu., Dam Van Tung, Kovalev A. Optimization of ship hull structures, taking into account their manufacturability. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023, no. 1(54), pp. 38–49. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-1/38-49>
6. Tryaskin V.N. Methodology of parametric designing of ship's hull structures. *Transactions of the Krylov State Research Center*, 2018, Special Issue 2, pp. 9–14. (In Russ.).
7. Tryaskin V.N., Yu Xinyan. Methodology of hull girder cross-sectional characteristics estimation on the preliminary stage of large containerships structural design. *Marine Intellectual Technologies*, 2020, vol. 2, no. 3(45), pp. 87–92. (In Russ.).
8. Faltinsen O.M. Challenges in hydrodynamics of ships and ocean structures. *Brodogradnja*, 2007, vol. 58, no. 3, pp. 268–277. URL: <https://hrcak.srce.hr/16590>
9. Novikov V.V., Turmov G.P., Surov O.E., German A.P., Molokov K.A., Kitaev M.V. Damage and computational analysis of the strength of ship structures / Sci. Ed. by G.Y. Illarionov. Vladivostok, Far Eastern University Publ., 2020, 266 p. (In Russ.).
10. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Complex approach to topological and parametric optimization of ship structures. *Transactions of the Krylov State Research Center*, 2020, no. 1(391), pp. 95–108. (In Russ.).
11. Plotnikov K.V., Tryaskin V.N. Formulation and solution of the problem of designing transverse tanker frames in the cargo part of large-tonnage oil tankers using the apparatus for approximation of the experiment planning method. *Marine Intellectual Technologies*, 2019, vol. 2, no. 3(45), pp. 93–100. (In Russ.).

12. Bugaev V.G., Dam Van Tung, Kitaev M.V., Novikov V.V. To the optimization of the shape and structure of the ship's hull from the system standpoint. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2023, no. 4(57), pp. 24–38. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/24-38>
13. Gordo J.M., Leal M. A tool for analysis of costs on the manufacturing of the hull. In: *Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources*. London, Taylor & Francis Group, 2018, pp. 743–748.
14. Leal M., Gordo J.M. Hull's manufacturing cost structure. *Brodogradnja*, 2017, vol. 68, no. 3. DOI: <https://dx.doi.org/10.21278/brod68301>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бугаев Виктор Григорьевич – доктор технических наук, профессор Департамента морской техники и транспорта Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),
✉ bugaev.vg@dvfu.ru

Viktor G. Bugaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Marine Engineering and Transport of Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Кашаев Владислав Михайлович – аспирант, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),
✉ vladikkashaev@mail.ru

Vladislav M. Kashaev, Postgraduate Student, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Китаев Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор Департамента морской техники и транспорта Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),
✉ kitaev.mv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>

Maksim V. Kitaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Marine Engineering and Transport of Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 12.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 25.02.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья
УДК 629.5.083.5
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/51-62>

Исследование и локализация неисправностей электродвигателя насоса по виброакустическим сигналам, обработанным методом дискретного вейвлет-преобразования

Владимир Иванович Короченцев, Валентин Вадимович Рыжих✉

Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация
✉ ryzhikh.vv@dvfu.ru

Аннотация. В статье приведены исследования вейвлет-скейлограмм виброакустического сигнала, работающего без нагрузки электродвигателя ДМН180L2 пожарного насоса, в динамике вращения, для оценки параметров диагностических признаков неисправностей, выявленных при работе механизма. Измерения проведены на подшипниковых щитах электродвигателя в радиальном и осевом направлениях.

Ключевые слова: вибродиагностика, судоремонт, дискретное вейвлет-преобразование, вейвлет-скейлограмма, виброметр, акселерометр

Для цитирования: Короченцев В.И., Рыжих В.В. Исследование и локализация неисправностей электродвигателя насоса по виброакустическим сигналам, обработанным методом дискретного вейвлет-преобразования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 51–62.

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION
OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Original article

Investigation and localization of pump electric motor faults using vibroacoustic signals processed by discrete wavelet transform

Vladimir I. Korochentsev, Valentin V. Ryzhikh✉

Far Eastern Federal University,
Vladivostok, Russian Federation,
✉ ryzhikh.vv@dvfu.ru

Abstract. The article presents research on wavelet scalograms of vibroacoustic signals from the unloaded DMN180L2 fire pump electric motor during rotational dynamics. The study aims to assess diagnostic parameters of faults identified during the operation of the mechanism. Measurements were conducted on the bearing housings of the electric motor in both radial and axial directions.

Keywords: vibration diagnostics, ship repair, discrete wavelet transform, wavelet scalogram, vibrometer, accelerometer

For citation: Korochentsev V.I., Ryzhikh V.V. Investigation and localization of pump electric motor faults using vibroacoustic signals processed by discrete wavelet transform. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 51–62. (In Russ.).

Введение

Техническое диагностирование вибрационных характеристик судовых механизмов и машин играет важную роль в процессе судоремонта, поскольку вовремя выявленный дефект в оборудовании позволяет сократить сроки и стоимость ремонта. Также позволяет повысить качество за счёт проведения вибрационного контроля на разных этапах ремонта, вплоть до сдаточных испытаний, и в большинстве случаев избежать рекламаций от заказчика.

1. Обзор методов анализа

Судовой насос представляет собой ключевой механизм для перекачивания жидкостей на судах и подвергается значительным вибрационным нагрузкам в процессе эксплуатации. Эти нагрузки могут быть вызваны как нормальными условиями работы, так и различными неисправностями, возникающими в электродвигателе или других элементах конструкции насоса. Для своевременной диагностики состояния оборудования важно применять методы анализа, способные эффективно выявлять и оценивать признаки дефектов на основе измерений вибраций.

Одним из наиболее перспективных методов диагностики является вейвлет-анализ (1), результатом непрерывного вейвлет-преобразования одномерного числового ряда (сигнала) является двумерный массив амплитуд – значений коэффициентов $C(a,b)$:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) |a|^{-1/2} \psi_0 \left[\left(\frac{t-b}{a} \right) \right] dt, \quad (1)$$

где $s(t)$ – сигнал;
 Ψ – базисная функция вейвлета;
 a – временной масштаб;
 b – временная локализация.

Распределение этих значений в пространстве (a, b) даёт информацию об изменении относительного вклада вейвлетных компонент разного масштаба во времени и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования, масштабно-временным (частотно-временным) спектром, вейвлет-спектром (wavelet spectrum) и скейлограммой. Вейвлет-анализ отличается высокой чувствительностью к нестационарным и кратковременным сигналам. В отличие от традиционных спектральных методов (например, преобразования Фурье), вейвлет-анализ позволяет одновременно анализировать временные и частотные характеристики сигнала. Это особенно важно для выявления локализованных аномалий, таких как импульсы, шумы или внезапные изменения параметров вибраций, которые часто характеризуют неисправности электродвигателя или редуктора насоса.

Для проведения вейвлет-анализа необходимо выбрать подходящий материнский вейвлет – функцию, которая определяет базис для разложения сигнала. Выбор конкретного типа материнского вейвлета зависит от особенностей анализируемого сигнала и целей исследования. Часто применяются такие классы вейвлетов, как «мексиканская шляпа», вейвлет Гаусса или вейвлет Морле, каждый из которых обладает уникальными свойствами для решения различных задач. Рассмотрим их подробнее.

Вейвлет Морле (Morlet)

$$\psi(t) = \exp^{-\left(\frac{t^2}{2}\right)} \cos(5t) \quad (2)$$

Обладает высокой разрешающей способностью как во временной, так и в частотной областях (рис. 1), что делает его идеальным для анализа нестационарных сигналов с преобладанием гармонических составляющих. Благодаря своей осциллирующей природе, этот вейвлет отлично выявляет периодические или почти периодические компоненты сигнала, имеет хорошо локализованный спектр, что помогает эффективно отделять различные частотные компоненты сигнала.

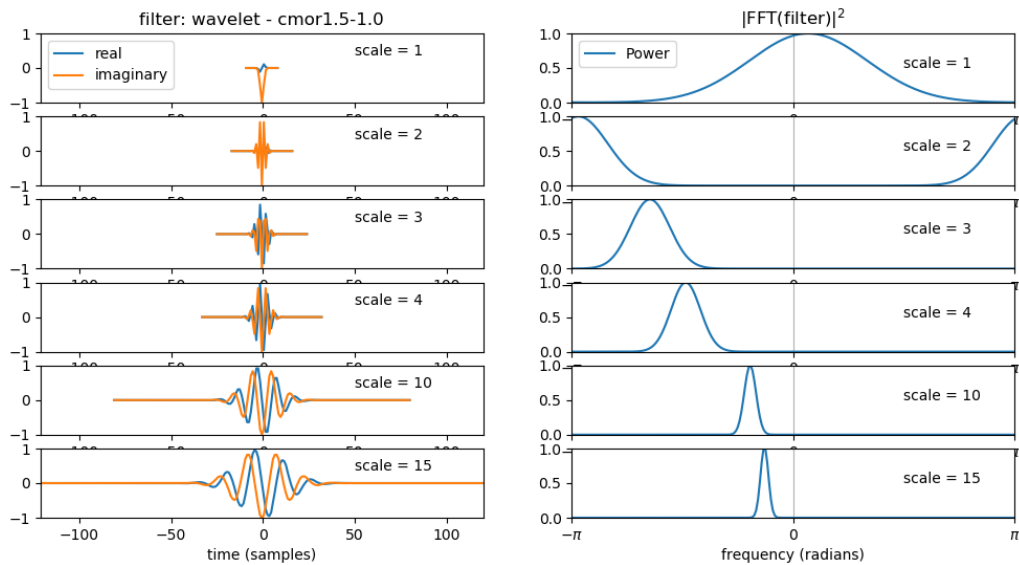


Рис. 1. Графическое изображение вейвлета Морле во временной и частотной областях

Fig. 1. Graphical representation of the Morlaix wavelet in the time and frequency domains

«Мексиканская шляпа» (“Mexican Hat”)

Является одним из наиболее популярных материнских вейвлетов, широко используемых в различных областях, включая вибродиагностику. Его название происходит от характерной формы графика функции, напоминающей традиционную мексиканскую шляпу. Математически вейвлет «мексиканская шляпа» представляет собой вторую производную от гауссовой функции (3).

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3^4\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) (1 - t^2) \quad (3)$$

Этот вейвлет обладает хорошей локализацией как во временной, так и в частотной областях (рис. 2), что позволяет эффективно анализировать сигналы, содержащие как медленно меняющиеся, так и быстрые компоненты. Благодаря своей форме он отлично выявляет резкие изменения или импульсы в сигнале, что особенно важно для диагностики механических систем, где такие события могут указывать на неисправности.

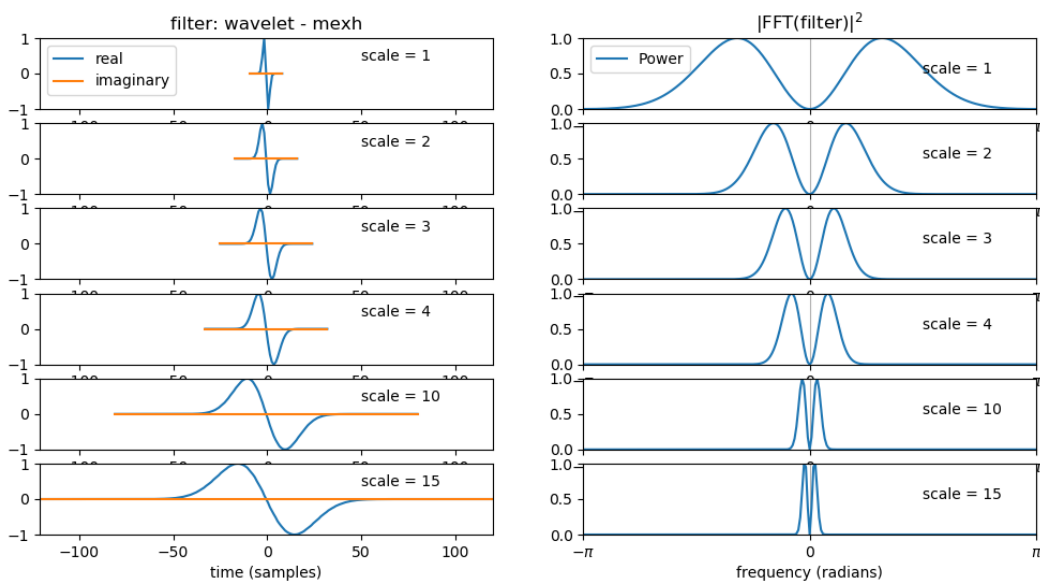


Рис. 2. Графическое изображение вейвлета «мексиканская шляпа» во временной и частотной областях

Fig. 2. Graphical representation of the “Mexican Hat” wavelet in the time and frequency domains

Многие механические неисправности, такие как повреждения подшипников, трещины на деталях или удары при работе, вызывают резкие импульсы в вибрационном сигнале. Вейвлет «мексиканская шляпа» способен эффективно выделять эти импульсы благодаря своей чувствительности к резким изменениям.

Вейвлет Гаусса (Gauss)

Представляет собой математическую функцию, которая является производной от гауссова распределения.

$$\psi(t) = C \exp^{-t^2} \exp^{-jt} \quad (4)$$

В вибродиагностике этот тип вейвлета используется для анализа сигналов, характеризующихся гладкими изменениями и низкой частотой шумов. Вейвлет Гаусса обладает бесконечно дифференцируемыми свойствами, что делает его подходящим для анализа гладких сигналов.

Он обеспечивает хорошую локализацию в частотной области, что полезно для выявления гармонических составляющих сигнала. Вейвлет Гаусса особенно (рис. 3) эффективен при работе с низкочастотными вибрационными сигналами, которые характерны для крупных механических систем, таких как судовые двигатели, турбины или насосы. Его способность к детальному анализу гармонических составляющих позволяет выявить даже слабые периодические компоненты в сигнале.

Некоторые дефекты, такие как трещины или износ подшипников, могут проявляться в виде плавных изменений вибрационного сигнала. Вейвлет Гаусса отлично справляется с детектированием таких изменений, поскольку он чувствителен к градиентам и производным сигнала.

Благодаря своей гладкой форме вейвлет Гаусса эффективно фильтрует высокочастотные шумы, сохраняя при этом важные информационные компоненты сигнала. Это особенно важно при работе с реальными измерительными данными, которые часто зашумлены.

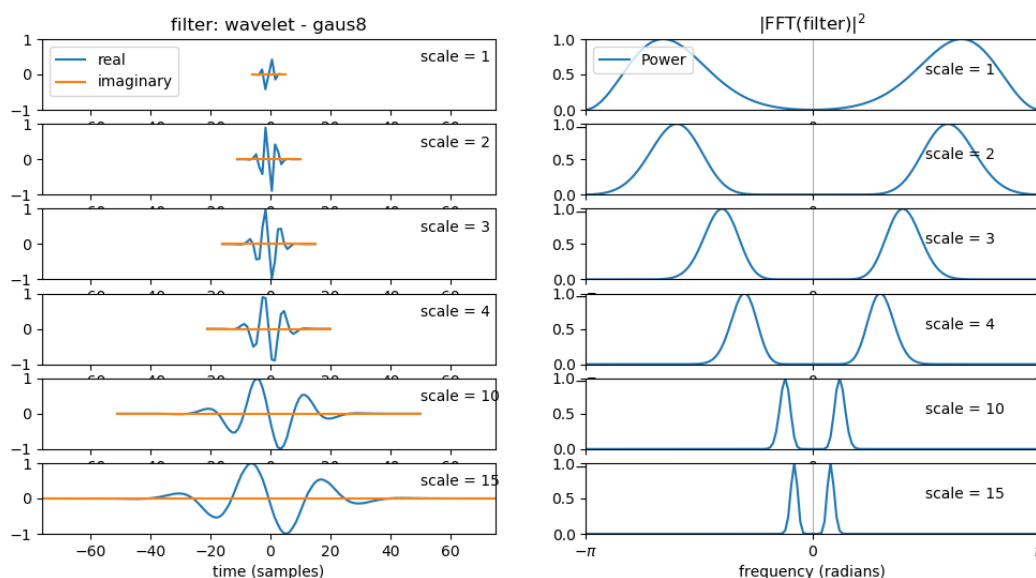


Рис. 3. Графическое изображение вейвлета Гаусса во временной и частотной областях

Fig. 3. Graphical representation of the Gauss wavelet in the time and frequency domains

Преимущества вейвлет-анализа для диагностики электродвигателя:

1. Высокая чувствительность к переходным процессам и ударам.
2. Возможность анализа временно-частотной динамики, что важно для диагностики механизмов, работающих с переменной нагрузкой.
3. Простота интеграции в существующие системы диагностики.

Таким образом, вейвлет-анализ является важным инструментом вибродиагностики электродвигателей, приводящих в движение различные механизмы, в т.ч. насосы, позволяя эффективно выявлять дефекты и прогнозировать их развитие.

2. Цели статьи:

1. Исследование применения вейвлет-скейлограмм для анализа виброакустического сигнала, получаемого с работающего без нагрузки электродвигателя ДМН180L2 пожарного насоса, с целью выявления диагностических признаков неисправностей.
2. Оценка динамики вибраций в вертикальном и продольном направлениях на подшипниковых щитах двигателя для определения потенциала вейвлет-методов в обнаружении дефектов и аномалий в работе механизма.
3. Оценка методов анализа вибрационных данных для повышения точности диагностики и мониторинга состояния электродвигателей на основе вейвлет-анализа.
4. Выявление характерных особенностей вибрационных сигналов, связанных с ударными звуками, исходящими от кормового подшипника электродвигателя. Сравнительный анализ с использованием различных материнских вейвлетов позволяет определить наиболее эффективный подход для диагностики неисправностей, а также проанализировать эволюцию параметров сигнала во времени и частоте.

3. Проведение измерений

Измерение вибрационных параметров электродвигателя осуществляется в соответствии с нормативными требованиями, установленными в «Правилах классификации и постройки морских судов» Российского морского регистра судоходства (РМРС). Точки измерения вибрации изображены на рисунке 4.

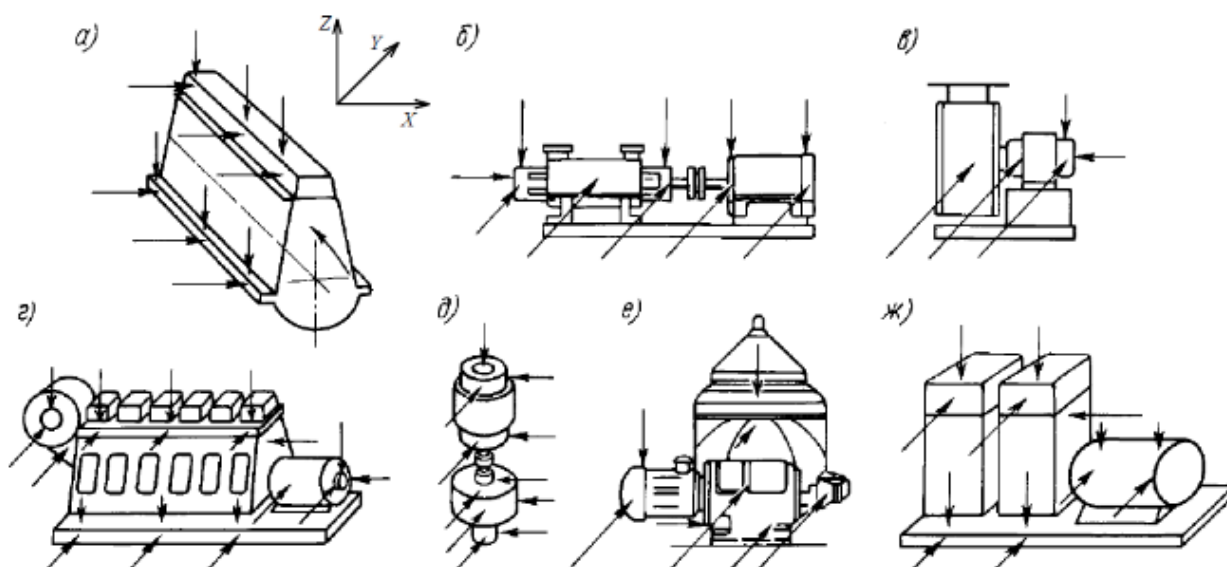


Рис. 4. Точки измерения вибрации:

**а – двигатель внутреннего сгорания; б – горизонтальный насос; в – вентилятор;
г – дизель-генератор; д – вертикальный насос; е – сепаратор; ж – поршневой компрессор.**
Стрелками указаны точки и направления измерения вибрации

Fig. 4. Vibration measurement points: а – internal combustion engine; б – horizontal pump; в – fan; г – diesel generator; д – vertical pump; е – separator; ж – reciprocating compressor.

The arrows indicate the points and directions of vibration measurement.

При проведении измерений использовались пьезоэлектрические датчики ускорения ИСР (акселерометры) модели АС102-1А, расположенные на подшипниковых щитах в вертикальном и осевом направлениях при устойчивой работе электродвигателя ДМН180L2,

жёстко закреплённого на фундаменте без насоса. В двигателе установлены подшипники типа 311. Сигнал с датчиков поступает в шумомер-виброметр, анализатор спектра «ЭКОФИЗИКА-110А», в нём сигналы с датчиков записываются и сохраняются для последующей обработки.

4. Обработка данных

В ходе исследования использовались данные вибрационных сигналов, полученные с трёх акселерометров, установленных на корпусе электродвигателя. Сигналы ускорения регистрировались при помощи шумомера-виброметра и анализатора спектра «ЭКОФИЗИКА-110А». Запись осуществлялась синхронно по трём каналам с частотой дискретизации 12 кГц и разрядностью 16 бит для каждого канала, что обеспечивало высокую точность цифрового представления измеряемых сигналов.

Для проведения вейвлет-анализа была разработана специальная программа на языке программирования Python, использующая библиотеку PyWavelets (PyWT). Данная программа позволяет строить скейлограммы вибрационных сигналов, что значительно облегчает интерпретацию результатов и выявление характерных особенностей сигнала во временной и частотной областях. Программа была специально адаптирована автором для исследовательских целей и обеспечивает возможность применения различных материнских вейвлетов для детального анализа сигналов.

Во время проведения эксперимента были отмечены органолептически различимые ударные звуки, исходящие со стороны кормового подшипника электродвигателя. Эти звуки, предположительно, связаны с наличием локальных дефектов или неисправностей в рассматриваемом узле. Для дальнейшего исследования данных записанных сигналов был применён метод вейвлет-преобразования, который позволяет эффективно анализировать нестационарные процессы и выявлять локальные изменения в структуре сигнала.

Для анализа вибрационных сигналов использовались три различных материнских вейвлета: «мексиканская шляпа» (“Mexican Hat”), вейвлет Морле (Morlet) и вейвлет Гаусса (Gaussian).

Каждый из выбранных материнских вейвлетов применялся для построения скейлограмм, что позволило провести сравнительный анализ и оценить способность различных типов вейвлетов выявлять особенности вибрационных сигналов, связанные с возможными дефектами электродвигателя.

5. Результаты измерений и их обсуждение

Проведённый эксперимент позволил зафиксировать вибрационные сигналы с трёх датчиков, установленных на корпусе электродвигателя. Анализ записанных данных показал наличие как периодических, так и импульсных компонент в сигнале. Органолептически различимые ударные звуки, исходящие со стороны кормового подшипника, нашли своё отражение в зарегистрированных временных рядах.

Для детального анализа использовались три различных материнских вейвлета: «мексиканская шляпа», вейвлет Морле и вейвлет Гаусса. Каждый из них позволил выявить уникальные особенности структуры вибрационного сигнала.

5.1 Анализ скейлограмм

Скейлограмма с использованием вейвлета Морле

Скейлограммы, построенные с помощью вейвлета Морле, наглядно демонстрируют гармонические составляющие сигнала: рисунок 5 – для точки измерения в вертикальном направлении на кормовом подшипнике (точка 1), рисунок 6 – для точки измерения в продольном направлении на кормовом подшипнике (точка 2) и рисунок 7 – для точки измерения в вертикальном направлении на носовом подшипнике (точка 3).

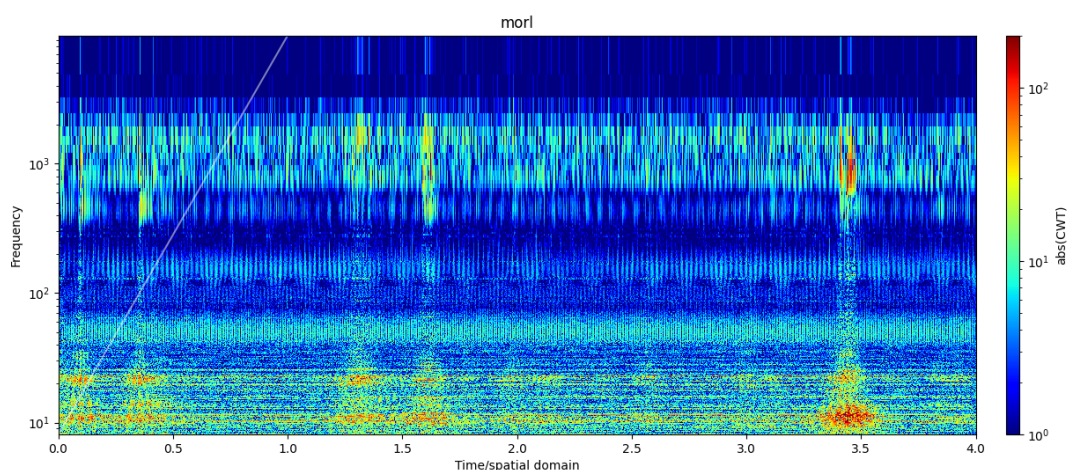


Рис. 5. Скейлограмма с использованием вейвлета Морле точки 1 в вертикальном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 5. A scalogram using the Morlaix wavelet of point 1 in the vertical direction on the aft bearing of the electric motor

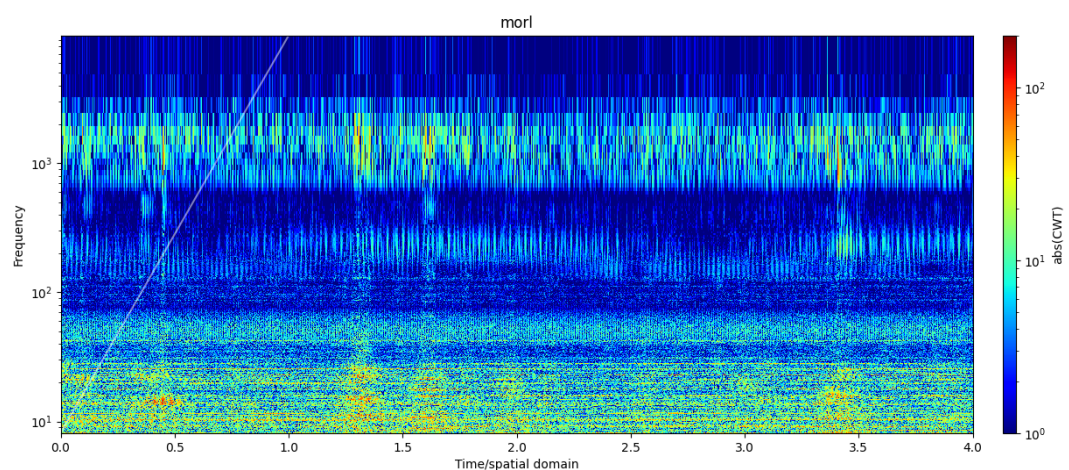


Рис. 6. Скейлограмма с использованием вейвлета Морле точки 2 в продольном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 6. A scalogram using the Morlaix wavelet of point 2 in the longitudinal direction on the aft bearing of the electric motor

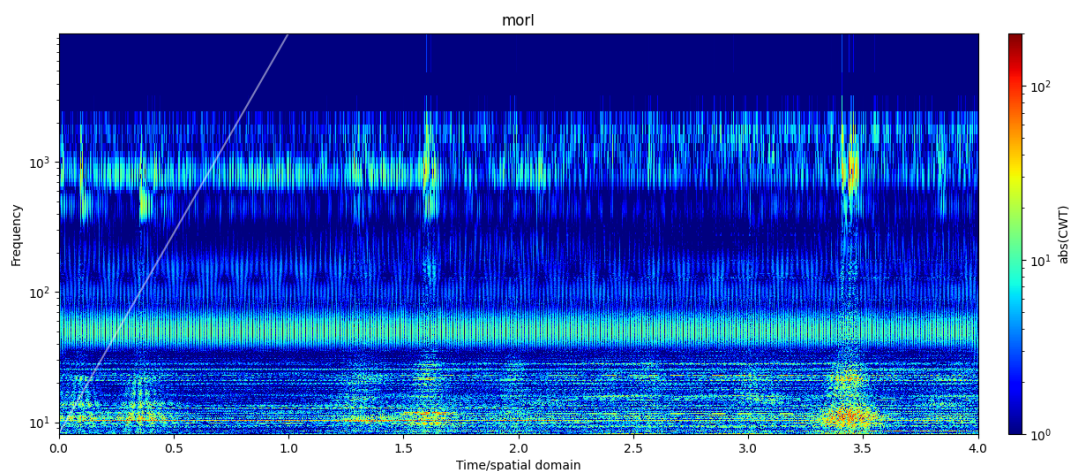


Рис. 7. Скейлограмма с использованием вейвлета Морле точки 3 в вертикальном направлении на носовом подшипнике электродвигателя

Fig. 7. A scalogram using the Morlaix wavelet of point 3 in the vertical direction on the nose bearing of the electric motor

На скейлограмме, построенной с использованием вейвлета Морле, чётко выделяются частотные компоненты, соответствующие основной частоте вращения ротора ($f_{rotor} = 50$ Гц) и её гармоникам ($2f_{rotor}$, $3f_{rotor}$, ...). Эти спектральные линии являются характерными для нормального режима работы электродвигателя и отражают регулярные процессы, связанные с вращением ротора.

Однако анализ спектра также выявил дополнительные частотные компоненты, расположенные вне основных гармонических составляющих. Среди них можно отметить следующие:

- частота перекачивания шариков по наружному кольцу подшипника ($f_{BPFO} = 247$ Гц),
- частота перекачивания шариков по внутреннему кольцу подшипника ($f_{BPFI} = 152$ Гц),
- сепараторная частота ($f_{FTF} = 31$ Гц),
- частота вращения шарика относительно корпуса подшипника ($f_{BSF} = 161,8$ Гц).

Наличие этих частотных компонент в спектре само по себе не обязательно свидетельствует о наличии механических повреждений. Такие частоты могут быть естественными спутниками нормальной работы подшипников качения и возникать даже при отсутствии дефектов. Ключевым индикатором наличия реальных повреждений являются импульсные возмущения, которые наблюдаются на скейлограммах в виде локальных пиков или модуляций сигнала.

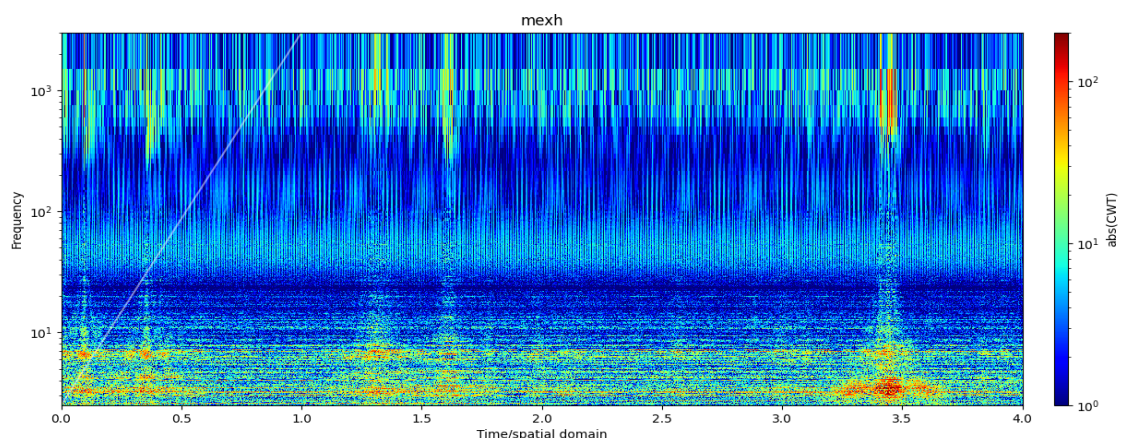


Рис. 8. Скейлограмма с использованием вейвлета «мексиканская шляпа» точки 1 в вертикальном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 8. A scalogram using the "Mexican Hat" wavelet of point 1 in the vertical direction on the aft bearing of the electric motor

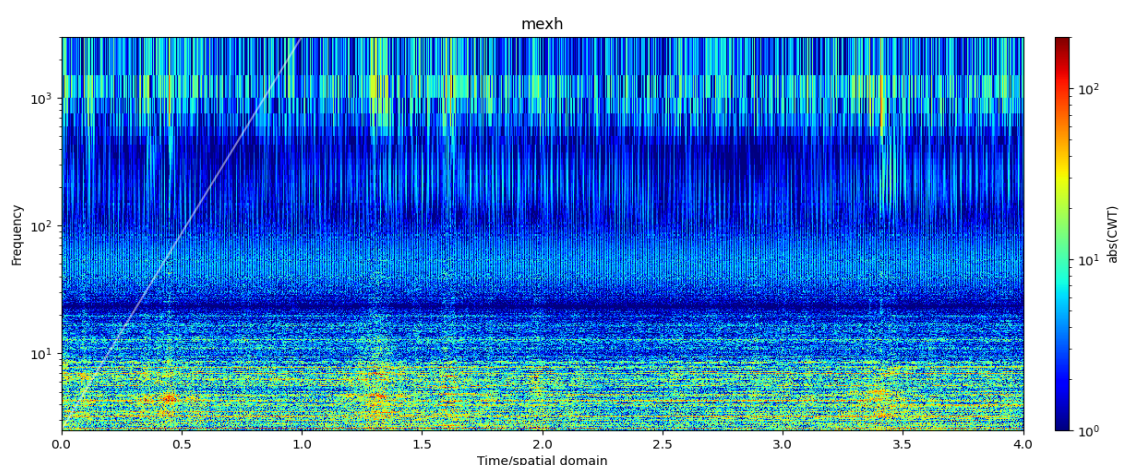


Рис. 9. Скейлограмма с использованием вейвлета «мексиканская шляпа» точки 2 в осевом направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 9. A scalogram using the "Mexican Hat" wavelet of point 2 in the axial direction on the aft bearing of the electric motor

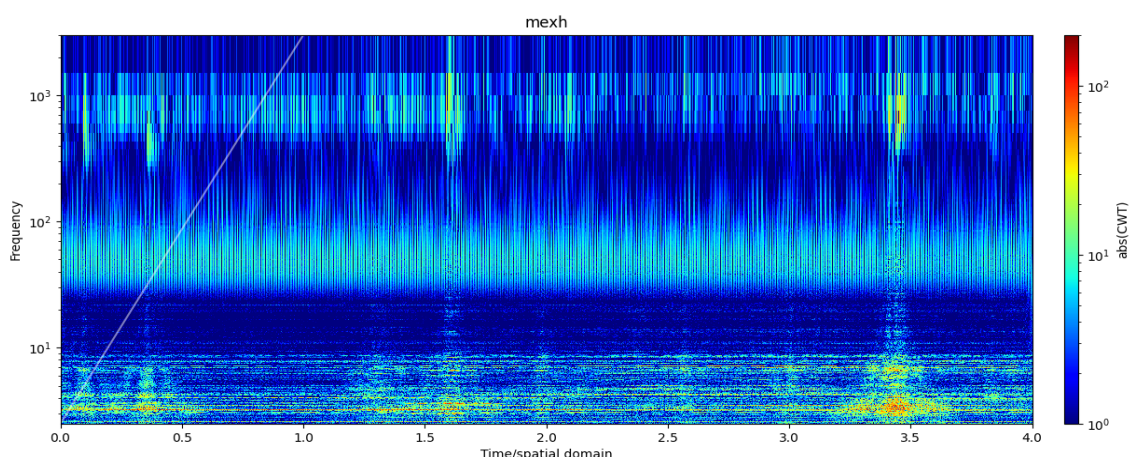


Рис. 10. Скейлограмма с использованием вейвлета «мексиканская шляпа» точки 3 в вертикальном направлении на носовом подшипнике электродвигателя

Fig. 10. A scalogram using the "Mexican Hat" wavelet of point 3 in the vertical direction on the nose bearing of an electric motor

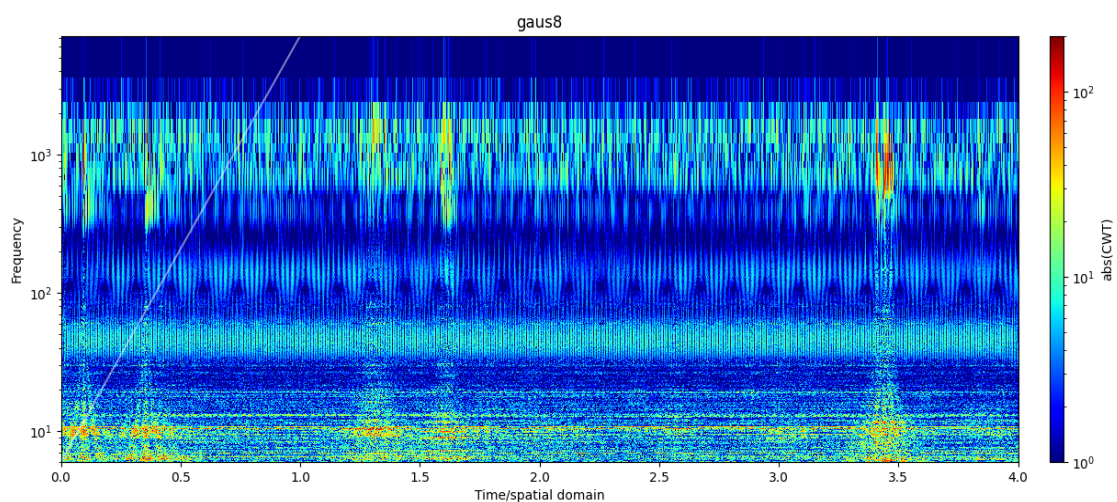


Рис. 11. Скейлограмма с использованием вейвлета Гаусса точки 1 в вертикальном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 11. A scalogram using the Gauss wavelet of point 1 in the vertical direction on the aft bearing of the electric motor

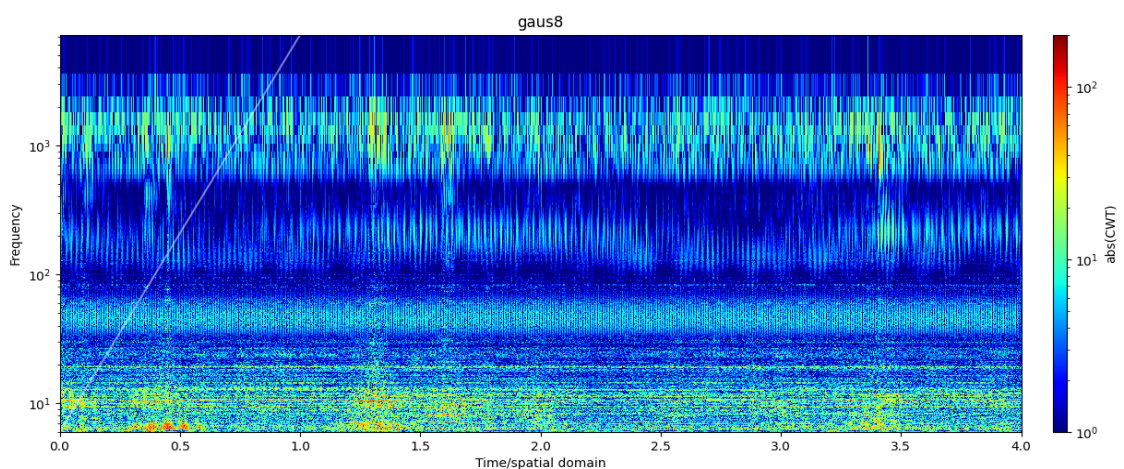


Рис. 12. Скейлограмма с использованием вейвлета Гаусса точки 2 в продольном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 12. A scalogram using the Gauss wavelet of point 2 in the longitudinal direction on the aft bearing of the electric motor

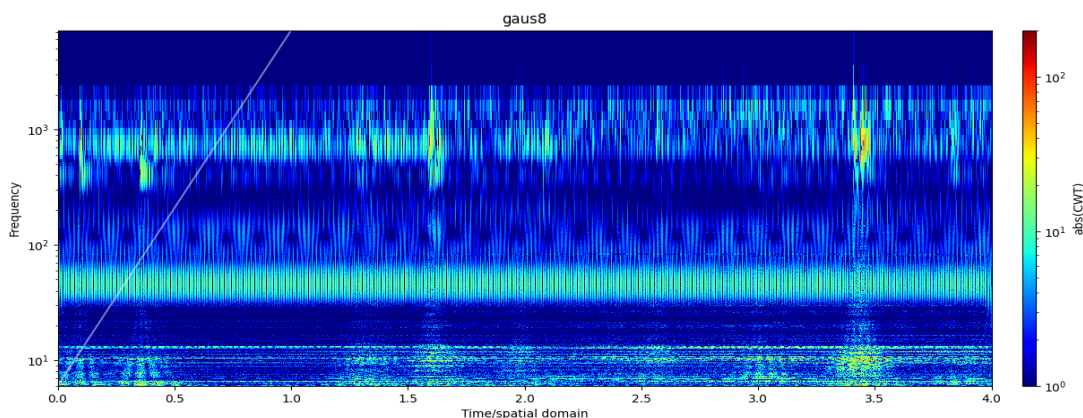


Рис. 13. Скейлограмма с использованием вейвлета Гаусса точки 3 в вертикальном направлении на носовом подшипнике электродвигателя

Fig. 13. A scalogram using the Gauss wavelet of point 3 in the vertical direction on the nose bearing of the electric motor

При детальном анализе скейлограммы, построенной с использованием вейвлета «мексиканская шляпа» (рис. 8, 9, 10), были выявлены характерные импульсные события, сосредоточенные во времени и частоте. Эти импульсы совпадают по временным интервалам с периодами, соответствующими частотам f_{BPFO} , f_{BPFI} , f_{FTF} и f_{BSF} , что позволяет предположить наличие дефектов в конструкции подшипника. Импульсные возмущения представляют собой явные признаки ударных процессов, вызванных, например, трещинами, выбоинами или другими механическими повреждениями элементов подшипника.

Анализ вибрационного сигнала с использованием вейвлета Морле (рис. 5, 6, 7) и вейвлета Гаусса (рис. 11, 12, 13) позволил выявить явление модуляции на частоте, соответствующей частоте вращения шариков подшипника (f_{BSF}). На скейлограмме эта модуляция проявляется в виде периодических изменений амплитуды спектральных компонент, сосредоточенных вокруг f_{BSF} и её гармоник. Данное явление наблюдается как регулярная вариация интенсивности сигнала во временной области.

При наличии органолептически различимых ударных звуков, исходящих со стороны кормового подшипника, выявление модуляции на частоте вращения шариков может быть связано с перекосом подшипника в подшипниковом щите. Перекос подшипника приводит к неравномерному распределению нагрузки между шариками и их контактными поверхностями, что вызывает следующие эффекты:

Неравномерный износ шариков и колец. Перекос создаёт условия для локального увеличения нагрузки на отдельные шарики или участки колец, что может привести к появлению механических дефектов. Каждый контакт дефектного участка с противоположной поверхностью вызывает импульсную нагрузку, которая модулирует общий вибрационный сигнал на частоте f_{BSF} .

Изменение геометрии контакта. При перекосе изменяется форма зоны контакта между шариками и кольцевыми поверхностями, что приводит к возникновению дополнительных силовых компонент. Эти изменения проявляются как модуляция амплитуды на частоте вращения шариков (f_{BSF}) и её гармониках.

Резонансные явления в деформированной системе. Перекос подшипника может вызвать деформацию конструкции подшипникового щита, что приводит к изменению собственных частот системы. Если эти частоты совпадают с f_{BSF} или её гармониками, возникает резонанс, усиливающий модуляцию на данной частоте.

Таким образом, хотя наблюдение характерных частотных компонент может указывать на потенциальные области интереса, окончательный вывод о наличии дефектов должен основываться на анализе импульсных возмущений, выявляемых с помощью методов, чувствительных к локальным изменениям структуры сигнала, таких как вейвлет-анализ с использованием материнских вейвлетов типа «мексиканская шляпа» (рис. 8, 9, 10).

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало высокую эффективность метода вейвлет-анализа для диагностики вибрационных сигналов электродвигателя, особенно при выявлении нестационарных процессов и локальных дефектов. Использование различных материнских вейвлетов («мексиканская шляпа», вейвлет Морле и вейвлет Гаусса) позволило получить всестороннюю информацию о структуре сигнала, что существенно улучшило точность интерпретации результатов.

Выявление гармонических составляющих. Вейвлет Морле успешно выделил основные спектральные компоненты, связанные с частотой вращения ротора (frotor) и её гармониками. Дополнительно была зафиксирована модуляция на частоте вращения шариков подшипника (fBSF), что указывает на возможные проблемы с геометрической установкой подшипникового узла, такие как перекос подшипника.

Обнаружение импульсных событий. Применение вейвлета «мексиканская шляпа» позволило эффективно детектировать импульсные возмущения, связанные с характерными частотами подшипника (fBPFO, fBPFI, fFTF, fBSF). Эти данные служат ключевыми индикаторами наличия механических повреждений или неравномерного износа элементов подшипника.

Комплексный анализ дефектов. Сравнительный анализ результатов, полученных различными типами вейвлетов, позволил сделать вывод о наличии перекоса подшипника в подшипниковом щите, что подтверждается модуляцией амплитуды на частоте fBSF. Это подчёркивает важность использования комплексного подхода для точной диагностики состояния оборудования.

Практическая значимость. Полученные результаты имеют важное практическое значение для обеспечения надёжности работы судовых механизмов и вибродиагностики в судоремонте. Выявленные методы анализа могут быть использованы для внедрения систем мониторинга и прогнозирования отказов, что позволит оптимизировать режимы обслуживания и минимизировать риск аварийных ситуаций.

Таким образом, применение метода вейвлет-анализа с использованием различных материнских вейвлетов доказало свою применимость для решения задач вибродиагностики. Результаты исследования открывают перспективы для дальнейшего развития автоматизированных систем диагностики, основанных на современных методах цифровой обработки сигналов, включая машинное обучение и искусственный интеллект.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.И. Короченцев – разработка концепции и дизайна исследования; В.В. Рыжих – сбор данных; анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

V.I. Korochentsev – development of the concept and design of the study; V.V. Ryzhikh – data collection; analysis and interpretation of the results; preparation and editing of the text. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов И.И. Вейвлет-анализ и мультифрактальная параметризация при оценке технического состояния цифровых систем: дисс. ... канд. техн. наук. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 150 с.
2. Подклетнов С.Г. Применение методов преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для вибродиагностики технического состояния тоннельных эскалаторов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 5. С. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32>

3. Стародубцев П.А., Дорофеев Г.В., Липовецкий А.О. Исследование параметров вибрации судовых конструкций вейвлет-анализом виброграмм // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2021. Т. 14, № 3. С. 307–317. DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0307>
4. Яблоков А.Е., Жила Т.М. Применение СНС в вибродиагностике по спектрограммам и вейвлет-скалограммам сигнала // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 452–457.

REFERENCES

1. Ivanov I. I. Wavelet analysis and multifractal parametrization in assessing the technical condition of digital systems: Ph. D. thesis. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2013. 150 p. (In Russ.).
2. Podkletnov S.G. Application of Fourier transform and wavelet transform methods for vibration diagnostics of the technical condition of tunnel escalators. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*, 2023, vol. 16, no. 5, pp. 24–32. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32>
3. Starodubtsev P.A., Dorofeev G.V., Lipovetsky A.O. Investigation of vibration parameters of marine structures using wavelet analysis of vibragrams. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 307–317. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0307>
4. Yablokov A.E., Zhila T.M. Application of CNS in vibration diagnostics using spectrograms and wavelet scalograms of signals. *Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 12, pp. 452–457. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Короченцев Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ vkoroich@mail.ru

Vladimir I. Korochentsev, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Рыжих Валентин Вадимович – магистр, аспирант, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ ryzhikh.vv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5498-1487>

Valentin V. Ryzhikh, Master's Degree, Postgraduate student, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 20.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 14.05.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья

УДК 621.891:621.436

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/63-74>**Методология проектирования
износостойких органо-неорганических материалов
для повышения долговечности трибосопряжения
«коленчатый вал – покрытие – вкладыш подшипника» судового
среднеоборотного дизеля****Лев Борисович Леонтьев^{1,✉}, Андрей Львович Леонтьев², Николай Павлович Шапкин¹,
Константин Александрович Молоков¹, Иван Борисович Друзь³**¹ Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация² ООО «Остов Констракшен»,
Владивосток, Российская Федерация³ Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

✉ leontev.lb@dvfu.ru

Аннотация. В работе представлены авторские исследования влияния химического состава органо-неорганических материалов, использованных для формирования тонкоплёночных металлокерамических покрытий на стали, и механических характеристик покрытий на эксплуатационные свойства трибосопряжения «коленчатый вал – покрытие – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля. Исследования влияния химического состава на износостойкость стали выполняли в два этапа: при формировании покрытия и в процессе триботехнических испытаний в условиях трения при граничной смазке. Для анализа влияния на эксплуатационные свойства трибосопряжения были взяты коэффициент трения и механические характеристики металлокерамических покрытий: модуль упругости, микротвёрдость и величина упругого восстановления покрытия. При формировании покрытия наибольшее влияние на износ стали оказывают содержание оксида алюминия и углерода, а также коэффициент трения. Установлено, что на долговечность трибосопряжения в условиях трения при граничной смазке наибольшее влияние оказывает модуль упругости металлокерамического покрытия. Определены критериальные значения механических свойств металлокерамического покрытия для обеспечения минимальной величины скорости его изнашивания. Наиболее высокой износостойкостью обладают покрытия и сопряжённые поверхности при использовании триботехнических материалов на основе вермикулита, имеющие минимальную величину модуля упругости и большое значение величины упругого восстановления покрытия.

Ключевые слова: вермикулит, химический состав, модифицирование, сталь, покрытие, механические свойства, скорость изнашивания, коэффициент трения

Для цитирования: Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Шапкин Н.П., Молоков К.А., Друзь И.Б. Методология проектирования износостойких органо-неорганических материалов для повышения долговечности трибосопряжения «коленчатый вал – покрытие – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 63–74.

Original article

Methodology for designing wear-resistant organic-inorganic materials to increase the durability of the “crankshaft-coating-bearing” liner tribocoupling of a medium-speed marine diesel engine

Lev B. Leontiev^{1,✉}, Andrey L. Leontiev², Nikolai P. Shapkin¹, Konstantin A. Molokov¹,
Ivan B. Druz³

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² Limited liability company “Ostov Construction”, Vladivostok, Russian Federation

³ Maritime State University named after the admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

✉ leontev.lb@dvfu.ru

Abstract. The paper presents the author's research into the influence of the chemical composition of organo-inorganic materials used to form thin-film metal-ceramic coatings on steel and the mechanical characteristics of the coatings on the performance properties of the “crankshaft-coating-bearing” liner tribocoupling of a medium-speed marine diesel engine. The study of the influence of the chemical composition on the wear resistance of steel was carried out in two stages: during the formation of the coating and during tribological tests under friction conditions with boundary lubrication. To analyze the influence on the performance properties of the tribocoupling, the friction coefficient and mechanical characteristics of the metal-ceramic coatings were taken: the modulus of elasticity, microhardness and the value of elastic recovery of the coating. When forming a coating, the greatest influence on steel wear is exerted by the content of aluminum oxide and carbon, as well as the friction coefficient. It was found that the modulus of elasticity of the metal-ceramic coating has the greatest influence on the durability of the tribocoupling under friction conditions with boundary lubrication. Critical values of mechanical properties of metal-ceramic coatings are determined to ensure a minimum value of its wear rate. The highest wear resistance is exhibited by coatings and mating surfaces when using vermiculite-based tribotechnical materials with a minimum value of elastic modulus and a high value of elastic recovery of the coating.

Keywords: vermiculite, chemical composition, modification, steel, coating, mechanical properties, wear rate, friction coefficient

For citation: Leontiev L.B., Leontiev A.L., Shapkin N.P., Molokov K.A., Druz I.B. Methodology for designing wear-resistant organo-inorganic materials to increase the durability of the “crankshaft-coating-bearing” liner tribocoupling of a medium-speed marine diesel engine. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 63–74. (In Russ.).

Введение

Для обеспечения заданной долговечности трибосистемы «коленчатый вал – покрытие – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля материал покрытия хотя бы одной из деталей пары трения должен обеспечить оптимальные триботехнические характеристики в заданных условиях работы, обеспечивающие минимальные скорости изнашивания сопряжённых поверхностей и коэффициент трения. Триботехнические характеристики трибосистемы (коэффициент трения, совместимость при трении, износостойкость, прирабатываемость) зависят от химического состава материала, используемого для формирования покрытия, механических свойств поверхностного слоя (пределы прочности и текучести, модуль упругости, величина твёрдости), а также структуры. Пределы прочности основного металла и покрытия определяют несущую способность узла трения, а модуль упругости и предел текучести характеризуют предельное значение контактных напряжений для упругих деформаций при фрикционном взаимодействии. Величина упругого восстановления покрытия также играет важную роль в механизме фрикционного взаимодействия. Исследования показали, что твёрдость материала не всегда является определяющим фактором износостойкости деталей при трении [1, 2].

Следует иметь в виду, что один и тот же материал, но нанесённый различными методами или даже одним методом, но с различными энергетическими параметрами, может существенно отличаться своими служебными свойствами вследствие получаемых различных физико-механических и структурных характеристик. Поэтому разработка перспективного материала не является гарантией обеспечения требуемых служебных свойств детали, а только в совокупности с другими технологическими решениями (выбор химического состава материала и способа его нанесения, оборудования, параметров режима формирования покрытия и т.д.) позволяет получить требуемое качество покрытия и надёжность детали и трибосопряжения.

В настоящее время для модифицирования поверхностей трения применяется большое количество различных триботехнических материалов, которые способны формировать износостойкие тонкоплёночные покрытия. По структуре и свойствам основных активных компонентов, оказывающих позитивное воздействие на трение и изнашивание, следует отметить мягкие металлы и сплавы (медь, молибден, цинк, бронза и др.) на основе серпентинита, вермикулита, глинистых материалов, композиций на основе политетрафторэтилена и наноалмазов, композиций, содержащих оксид меди и дисульфид молибдена, и многих других [2–6].

Для повышения долговечности трибосопряжений перспективно формировать композитные тонкоплёночные износостойкие покрытия в результате фрикционно-механического воздействия при упрочнении поверхностей трения деталей при их изготовлении или восстановлении [5].

Обзор многочисленных исследований показал, что задача прогнозирования эксплуатационных свойств трибосистем, имеющих металлокерамические покрытия, является комплексной и требует интегрированного подхода, объединяющего принципы триботехники, трибофизики и трибохимии. Фундаментом для этого может служить приближённая модель зависимости скорости изнашивания от химического состава исходного износостойкого неорганического материала и формируемых триботехнических и механических свойств покрытия для уменьшения объёма экспериментальных исследований.

Многие аспекты проблемы влияния химического состава и формируемых механических свойств тонкоплёночных покрытий, полученных при использовании слоистых силикатов, на эксплуатационные свойства трибосопряжений требуют теоретического обобщения. Сложность решения данной проблемы определяется зависимостью механических и триботехнических свойств формирующихся покрытий от множества параметров применяемого материала: химического состава, структуры, физико-химических и геометрических параметров и др. Поэтому разработка новых трибоматериалов связана с большим объёмом экспериментальных исследований для обеспечения стабильности свойств, надёжности и эффективности покрытия. Технология получения наноструктурированных композитов и композиций на основе вермикулита для формирования металлокерамических покрытий на поверхностях трения, обладающих минимальным коэффициентом трения и высокими износо- и задиростойкостью, открывает перспективы широкого их использования в качестве триботехнических материалов [2]. Однако многие аспекты проблемы зависимости эксплуатационных свойств тонкоплёночных покрытий от химического состава и структуры используемых триботехнических материалов требуют дополнительных исследований и обобщения.

Анализ зарождения и развития повреждения поверхности трения с позиций структурной механики разрушения составляет сущность нового подхода к пониманию микромеханизмов изнашивания. Основная научная идея – установление взаимосвязи твёрдости, модуля упругости и структуры поверхности детали с износостойкостью [7, 8].

Для формирования оптимального комплекса механических, структурных и триботехнических параметров покрытия необходимо разработать методологию проектирования триботехнических материалов. Для этого нужно создать алгоритм проектирования оптимального химического состава материала и определить влияние механических характеристик на эксплуатационные свойства формируемых покрытий для уменьшения объёма исследований. Предлагаемая методология была апробирована при разработке триботехнических материалов для наиболее ответственного трибосопряжения «шейка коленчатого вала – покрытие – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля.

Цель работы – разработка методологии проектирования оптимального химического состава материала и определение зависимостей эксплуатационных свойств трибосопряжения от химического состава органо-неорганического материала и механических характеристик формируемых покрытий для уменьшения объёма исследований.

Материалы и методы исследований

В качестве базового материала для исследований был взят природный вермикулит Ковдорского месторождения, имеющий состав $\text{MgFe}_{0,8}\text{Ca}_{0,9}\text{Al}_{0,4}\text{Si}_3\text{O}_{11,7}\text{H}_2\text{O}$. Вермикулит имеет слоистую структуру и содержит большое количество оксидов кремния, магния и алюминия.

Модифицирование вермикулита кислотой позволяет уменьшить содержание оксида алюминия в 2,3 раза, который характеризуется высокими абразивными свойствами, и повысить количество оксида кремния в 2,1 раза за счёт растворения оксидов магния, железа и кальция.

Для изменения эксплуатационных свойств металлокерамических покрытий создавались композиции и композиты на основе вермикулита с искусственными и природными органо-неорганическими материалами.

Полифенилсилоксан (ПФС) – искусственный слоистый силикат, имеющий стабильный химический состав $[\text{C}_6\text{H}_5\text{SiO}_{1,5}]_n$.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) – синтетический полимер, имеющий формулу $(-\text{C}_2\text{F}_4-)_n$.

Полистирол – синтетический полимер, химическая формула которого $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n$.

Целлюлоза – природное высокомолекулярное органическое соединение, полисахарид с формулой $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$.

Хитозан представляет собой природный полисахарид, содержащий 41,8% углерода, 7,5% азота и 8,8% воды. Брутто-формула хитозана $(\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4\text{NH}_2)_n$.

Полирезорцинформальдегидная смола (ПРФС) – синтетическая смола, химическая формула $(\text{Ph}(\text{OH})-\text{CH}_2-)_n$.

Стеарат никеля – химическое соединение, соль никеля и стеариновой кислоты с формулой $\text{Ni}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2$, зелёный порошок.

Ацетилацетонат меди – координационное соединение с формулой $\text{Cu}(\text{O}_2\text{C}_5\text{H}_7)_2$. Это водорастворимое ярко-синее твёрдое вещество. Монокристаллы этого соединения обладают необычным свойством высокой гибкости, что позволяет образовывать узлы. Гибкость объясняется природой межмолекулярных сил.

Для исследования использовали как смеси порошков (композиции), так и вермикулит, плакированный различными органо-неорганическими материалами (композиты).

Плакирование вермикулита и вермикулита, модифицированного кислотой, целлюлозой, ПФС, ПТФЭ, ПРФС, хитозаном и стеаратом никеля, позволяет изменить химический состав износостойкого материала (например, ввести в состав углерод или производную молибдена) и, соответственно, управлять механическими и триботехническими свойствами формируемого покрытия.

Триботехнические испытания проводили на универсальной машине трения модели УМТВК по схеме «ролик – колодка» в условиях граничного трения при постоянной скорости скольжения 0,63 м/с для сопряжения «шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника», так это один из наиболее ответственных узлов судового дизеля, определяющий необходимость его капитального ремонта. В качестве неподвижного образца использовались колодки, вырезанные из современного вкладыша типа «Rillennlager» («Miba» 33). Диски для упрочнения были изготовлены из стали 40Х твёрдостью 206 НВ и из стали 45 твёрдостью 162 НВ, так как свыше 80% коленчатых валов судовых дизелей имеют твёрдость шеек в диапазоне 160–230 НВ. Смазку пары трения осуществляли капельным способом (6–7 капель в минуту). Для смазки применялось работающее дизельное масло марки М-14-Д₂(цл 30) ГОСТ 12337-84.

Нагрузку при формировании покрытия и трибоиспытаниях изменяли в соответствии с режимами, приведёнными в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Режимы формирования покрытия и триботехнических испытаний
Coating formation and tribological testing modes

Нагрузка, Н	100	200	400
Время формирования покрытия с триботехническим материалом в смазке, мин.	1	1	1
Время формирования покрытия без триботехнического материала в смазке, мин.	5	10	45
Время трибоиспытаний, мин.	5	10	45

Износ образцов определяли весовым способом на лабораторных весах с ценой деления 0,1 мг марки AUW 220D фирмы Shimadzu (Япония).

Исследование механических свойств покрытий выполняли на ультрамикротестере DUN-211S фирмы Shimadzu (Япония) при нагрузке 19,7 мН (максимальная глубина отпечатка 0,13 мкм), которая позволяет избежать влияния основного металла (толщина покрытия колеблется в пределах 6–8 мкм). Величину упругого восстановления покрытий определяли по формуле [10]:

$$W_e = \frac{(h_{\max} - h_r)}{h_{\max}}.$$

где h_r – глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки;
 $h_{\max}$ – максимальная глубина отпечатка при максимальной нагрузке $P_{\max}$.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Проектирование триботехнических материалов для формирования металлокерамических износостойких покрытий на поверхностях трения деталей, обеспечивающих заданную долговечность, проводили в соответствии с блок-схемой (рис. 1).

Химическая обработка (ХО) исходных материалов позволяет изменять их химический состав, размер частиц, физико-химические характеристики и структуру. Термическая обработка (ТО) существенно изменяет триботехнические свойства как однокомпонентных материалов, так и композиций вследствие изменения химического состава (происходит удаление молекулы воды при температуре 600–700 °С) [2].

Износ поверхности трения происходит как в процессе её модифицирования, так и в процессе эксплуатации дизеля. Для повышения долговечности коленчатого вала необходим материал, обеспечивающий минимальные скорости изнашивания шеек на обоих этапах (упрочнения и эксплуатации). Для оптимизации химического состава триботехнического материала необходимы математические зависимости влияния состава материала, механических и триботехнических свойств покрытия на скорости изнашивания.

В процессе формирования металлокерамического покрытия фрикционно-силовым методом происходит изнашивание стали, причём скорость изнашивания определяется преимущественно химическим составом триботехнического материала (табл. 2), в первую очередь содержанием алюминия и углерода, в меньшей степени – коэффициентом трения. Обработка результатов экспериментов (табл. 2) позволила установить зависимость скорости изнашивания стали в процессе формирования покрытия от содержания оксида алюминия и углерода, а также от коэффициента трения при наличии триботехнического материала в смазке ($R^2 = 0,85$):

$$V_{\text{и}} = -2,28 + 0,412A/O_2 + 0,157C + 16,25 k_{\text{тр}}. \quad (1)$$

Наибольшее влияние на скорость изнашивания стали при формировании покрытия оказывает содержание оксида алюминия в модифицирующем материале, меньшее количество углерода и коэффициент трения (рис. 2). Оксид алюминия, с одной стороны, повышает износостойкость покрытия, а с другой – приводит к повышенному изнашиванию при формировании покрытия в начальном периоде вследствие его высоких абразивных свойств.

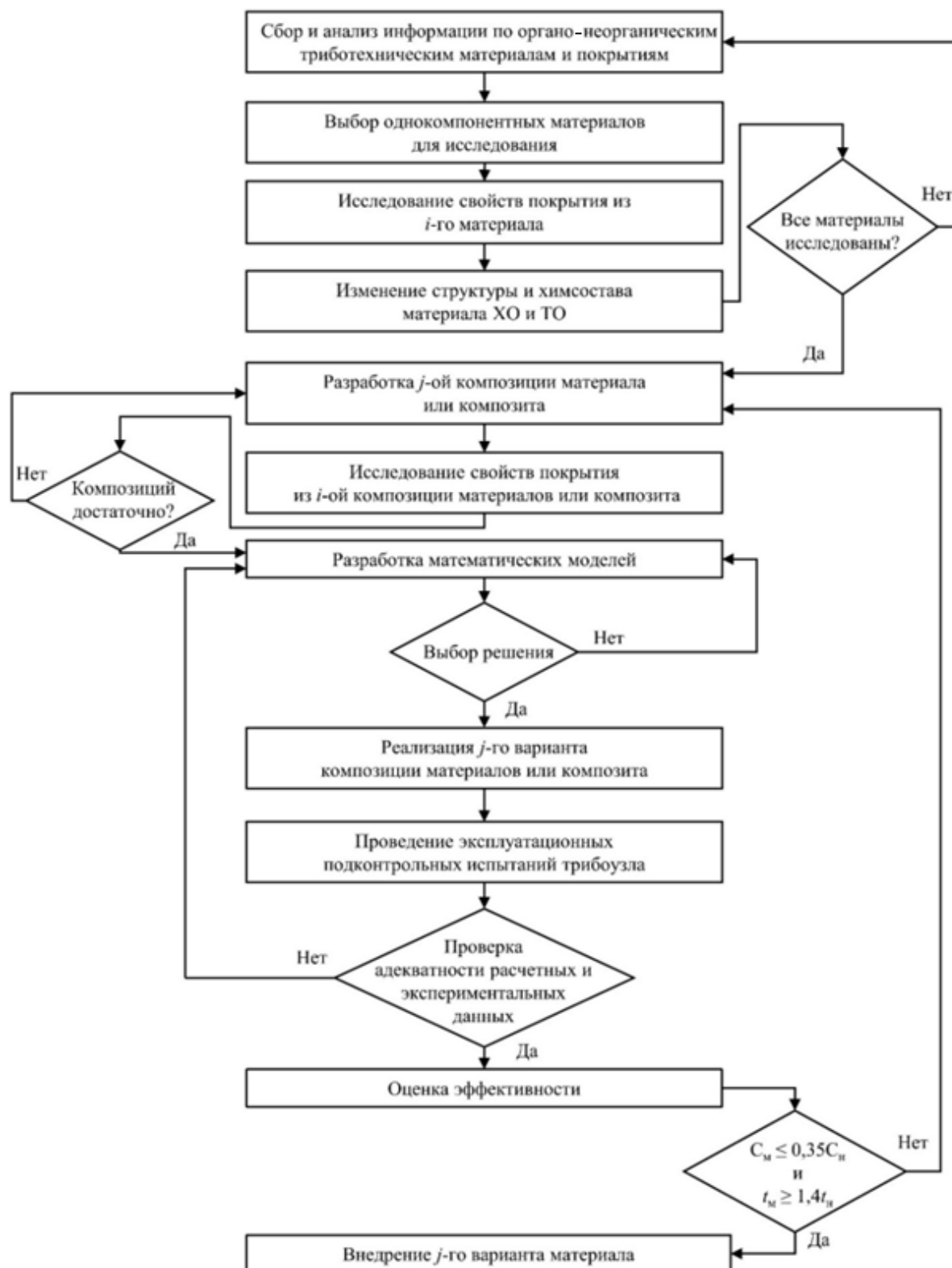


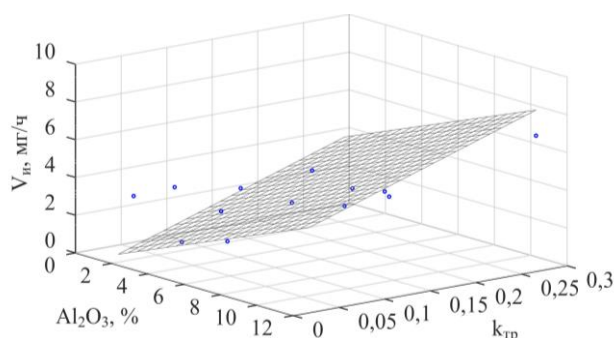
Рис. 1. Блок-схема проектирования оптимального химического состава триботехнических материалов для формирования износостойких покрытий
(C_m – стоимость триботехнического материала; C_n – стоимость формирования покрытия;
 t_b – ресурс детали с износостойким покрытием; t_n – ресурс новой детали;
ХО – химическая обработка; ТО – термическая обработка)

Fig. 1. Block diagram for designing the optimal chemical composition of tribotechnical materials for forming wear-resistant coatings (C_m – cost of tribotechnical material; C_n – cost of forming coating;
 t_b – service life of a part with wear-resistant coating; t_n – service life of a new part;
 XO – chemical treatment; TO – heat treatment)

Таблица 2 / Table 2

**Основные элементы триботехнического материала, коэффициент трения
и скорость изнашивания при формировании покрытия на поверхности стали 40X**
Main elements of tribotechnical material, friction coefficient and wear rate during coating
formation on the surface of 40X steel

№ п/п	Материал	Al ₂ O ₃ , %	С, %	Коэффициент тре- ния в начальный период формиро- вания покрытия	Скорость изнашивания, мг/ч
Однокомпонентные материалы					
1	Вермикулит	11,8	–	0,270	7,1
2	Вермикулит + HCl	5,2	–	0,200	3,1
Композиции материалов					
3	Вермикулит + 9% ПФС	10,5	5,2	0,135	4,7
4	Вермикулит + 50% ПТФЭ	5,8	12,	0,144	4,7
5	Вермикулит + 9% ацетилацетоната меди	9,8	4,7	0,144	4,7
6	Вермикулит + HCl + производная молибдена*	5,0	–	0,057	0,2
7	Вермикулит + HCl + ПФС	3,1	10,	0,098	2,2
Композиты					
8	Вермикулит + ПФС	10,2	5,5	0,092	4,5
9	Вермикулит + ПТФЭ	6,5	10,	0,108	3,5
10	Вермикулит + HCl + хитозан	1,26	9,4	0,156	2,4
11	Вермикулит + HCl + полистирол	3,0	5,6	0,057	0,9
12	Вермикулит + HCl + целлюлоза*	4,5	7,5	0,028	0,2
13	Вермикулит + HCl + ПРФС	4,1	2,9	0,085	1,0
14	Вермикулит + HCl + 50% стеарата никеля	2,6	23,	0,057	3,7
15	Вермикулит + HCl + 70% стеарата никеля	2,1	33,	0,022	3,4
<i>Примечание:</i> * – Данные результаты при определении зависимости (1) не учитывались вследствие существенного отличия их параметров скорости изнашивания.					



**Рис. 2. Влияние содержания оксида алюминия в модифицирующем материале
и коэффициента трения на скорость изнашивания
при формировании покрытия на поверхности стали 40X**

Fig. 2. The influence of aluminum oxide content in the modifying material and the friction coefficient
on the wear rate during the formation of a coating on the surface of 40X steel

Плакирование частиц вермикулита природными и синтетическими полимерами (целлюлозой, хитозаном, ПФС, ПТФЭ, ПРФС) позволяет уменьшить его абразивные свойства на этапе формирования покрытия.

Коэффициент трения наибольший при наличии триботехнического материала в смазке, а также в первые 5 минут формирования покрытия при подаче чистой смазки, затем плавно снижается и после 20–30 минут стабилизируется и изменяется незначительно в небольшом диапазоне.

Для большинства материалов увеличение содержания углерода приводит к возрастанию скорости изнашивания вследствие образования карбида кремния в условиях высоких температуры и удельной нагрузки на пятнах контакта сопряжения «вал – индентор», исключение составляет вермикулит, плакированный целлюлозой. Несмотря на высокое содержание кремния, он не оказывает влияния на скорость изнашивания при формировании покрытия вследствие особенностей строения целлюлозы.

Плакирование частиц вермикулита природными и синтетическими полимерами (целлюлозой, хитозаном, ПФС, ПТФЭ, ПРФС) позволяет уменьшить его абразивные свойства на этапе формирования покрытия.

Минимальными величинами скорости изнашивания и коэффициента трения в процессе модифицирования, причём существенно меньше определённых по формуле 1, характеризуются композит вермикулит + HCl + целлюлоза и композиция модифицированного вермикулита с производной молибдена вследствие изменения как условий трения, так и процесса формирования покрытия.

Частицы неплакированного вермикулита оказывают царапающее воздействие на упрочняемую поверхность вследствие их размера, значительно превышающего параметры шероховатости детали. Плакирование вермикулита более мягкими материалами снижает скорость изнашивания стали в процессе формирования покрытия, но остаётся значительной по сравнению с использованием вермикулита, модифицированного соляной кислотой.

Таким образом, для получения минимальной скорости изнашивания стали на этапе формирования покрытия необходимо, чтобы содержание оксида алюминия в триботехническом материале на основе вермикулита находилось в пределах 4,5–5,2%.

Химический состав триботехнического материала на этапе триботехнических испытаний оказывает влияние через различные величины механических и триботехнических параметров (табл. 3). Наибольшую величину модуля упругости имеет покрытие, полученное при использовании ПТФЭ, наименьшее – вермикулита. Максимальная величина упругого восстановления покрытия обеспечивается при использовании ПФС для плакирования частиц вермикулита, несколько меньшее – при применении ПТФЭ и композиций вермикулита с хитозаном.

Величины механических свойств поверхностного слоя стали, который участвует в процессе трения, существенно отличаются от параметров основного металла (подповерхностного слоя), поэтому максимальная глубина отпечатка от индентора при определении механических свойств исходной стали и покрытия не должна превышать 0,5 мкм, которая обеспечивается при нагрузке 19,7 мН. При нагрузке 150–218 мН максимальная глубина отпечатка находится в пределах 0,6–1,6 мкм в зависимости от микротвёрдости слоя. С увеличением максимальной глубины отпечатка свыше 0,5 мкм изменяются модули упругости и микротвёрдости как стали, так и покрытия вследствие существенного влияния свойств основного металла, которые становятся близкими к параметрам подслоя.

Анализ механических свойств поверхностного слоя неупрочнённых сталей 40Х и 45 показал, что в результате трибоиспытаний нанотвёрдость и величина упругого восстановления возрастают, а модуль упругости уменьшается (табл. 3). В процессе триботехнических испытаний механические свойства поверхностного слоя стали существенно изменяются и характеризуются значительным разбросом величин, соответственно, и скорости изнашивания как вала, так и вкладыша имеют большой диапазон значений. Наибольшее влияние на скорость изнашивания вала оказывает твёрдость основы: увеличение твёрдости в 1,4 раза приводит к уменьшению средней скорости изнашивания в 3,4 раза.

Формирование металлокерамических покрытий позволяет существенно снизить скорость изнашивания вала в условиях трения при граничной смазке, а также скорость изнашивания вкладыша подшипника для большинства типов покрытий (табл. 4).

Обработка результатов экспериментов (табл. 3) позволила установить зависимость скорости изнашивания вала в условиях трения при граничной смазке для стали 40Х (2) от механических характеристик металлокерамического покрытия и коэффициента трения ($R_2 = 0,9$):

$$V_b = 0,58 + 0,077 \cdot 10^{-5} E - 0,0005 HV - 0,176 We + 4,14 K_{тр}. \quad (2)$$

Таблица 3 / Table 3

**Механические свойства сталей и сталей с различными износостойкими покрытиями
и триботехнические свойства пары трения «вал – вкладыш подшипника»**
Mechanical properties of steels and steels with various wear-resistant coatings and
tribotechnical properties of the friction pair "shaft – bearing shell"

Материал для формирования покрытия вала	Модуль упругости покрытия $E \times 10^5$, Н/мм ²	Нанотвёрдость, HV	Величина упругого восстановления покрытия W_e	Коэффициент трения	Скорость изнашивания вала, мг/ч	Скорость изнашивания вкладыша, мг/ч
Сталь 40Х, твёрдость 215 НВ						
Сталь после шлифования	10,3	356	0,68	–	–	–
Сталь после трибоиспытания	9,6	588	0,76	0,043	2,6	10,5
	8,5	610	0,85	0,079	1,7	5,1
Вермикулит	1,2	594	0,25	0,038	0,5	3,5
ПТФЭ*	18,5	406	1,27	0,054	1,6	2,1
Композиция (вермикулит + ПТФЭ)*	10,8	578	0,85	0,050	1,0	1,3
Вермикулит + HCl	1,1	699	0,70	0,036	0,3	1,8
Композиция (вермикулит + HCl + хитозан)	6,5	544	0,92	0,043	0,8	3,0
Композит (вермикулит + HCl + + хитозан)	3,8	480	1,15	0,036	0,5	5,1
Композиция (вермикулит + HCl) + + ПФС	5,9	544	2,04	0,014	0,4	5,3
Композит вермикулит + ПФС	1,8	587	0,85	0,029	0,4	2,6
Композиция (вермикулит + HCl) + + производная молибдена	3,8	468	0,72	0,022	0,6	1,7
Вермикулит + HCl + целлюлоза	1,9	420	0,5	0,022	0,5	5,6
Сталь 45, твёрдость 152 НВ						
Сталь после шлифования	12,6	482	0,43	–	–	–
Сталь после трибоиспытания	11,4	559	0,68	0,042	5,0	8,0
	12,0	542	0,46	0,060	9,7	6,2
Вермикулит	1,8	514	0,86	0,043	2,2	4,0
Композит вермикулит + магнийфенилсилоксан	1,7	587	0,85	0,024	1,6	2,6
Композит: вермикулит + хитозаном + MgCO ₃	2,3	604	2,23	0,024	0,71	3,2
Серпентинит	4,2	489	0,85	0,014	1,9	2,5

Наибольшей износостойкостью обладают покрытия, имеющие минимальную величину модуля упругости и максимальную величину упругого восстановления. Таким образом, изменяя химический состав модифицирующего материала, можно управлять износостойкостью покрытия.

Анализ износостойкости покрытий на стали 45 в условиях трения при граничной смазке показал аналогичное влияние параметров (формула 2), только необходимо учитывать влияние твердости основного металла (коэффициент влияния колеблется в пределах 4,2–4,5).

Анализ износостойкости покрытий позволяет определить критериальные значения механических свойств металлокерамического покрытия для обеспечения минимальной величины скорости его изнашивания:

- модуль упругости, Н/мм² $(1,1–3,8) \times 10^{-5}$;
- величина упругого восстановления $\geq 0,7$.

Модуль упругости покрытия оказывает наибольшее влияние на его скорость изнашивания (рис. 3), величина упругого восстановления покрытия оказывает существенное влияние при её значениях больше 1, влияние твёрдости и коэффициента трения минимально.

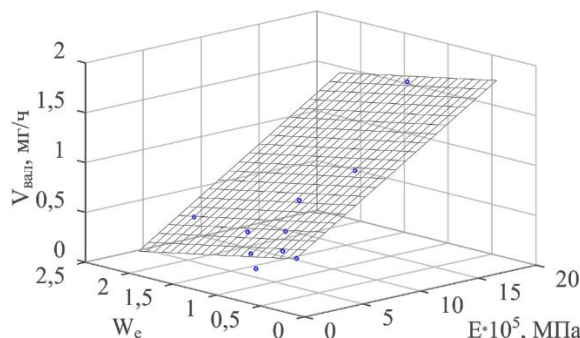


Рис. 3. Зависимость скорости изнашивания модифицированной стали от величин модуля упругости и упругого восстановления покрытия

Fig. 3. Dependence of the wear rate of modified steel on the values of the modulus of elasticity and elastic recovery of the coating

Следует отметить, что по мере изнашивания тонкоплёночного покрытия величина модуля упругости поверхностного слоя возрастает у материалов с низким значением, но уменьшается у покрытий с величиной большей, чем у неупрочнённой стали, и приближается к величине её модуля.

Скорость изнашивания вкладыша практически не зависит от твёрдости основы стали и покрытия, а определяется величинами коэффициента трения и упругого восстановления покрытия. Минимальная скорость изнашивания вкладыша обеспечивается при минимальном коэффициенте трения. Величины упругого восстановления и модуль упругости покрытия оказывают существенное влияние при значениях $We > 1,0$ и $E > 10 \text{ Н/мм}^2$.

Анализ износостойкости вкладыша подшипника позволяет определить критериальные значения коэффициента трения и механических свойств металлокерамического покрытия для обеспечения минимальной величины скорости его изнашивания:

- коэффициент трения $< 0,043$;
- нанотвёрдость, HV > 550 ;
- величина упругого восстановления $\geq 1,0$.

Анализ результатов испытаний различных материалов для формирования покрытий показал, что наиболее перспективными являются вермикулит, композиты и композиции на его основе, которые позволяют получить минимальную величину модуля упругости и низкий коэффициент трения в условиях работы трибосистемы при граничной смазке. Различные добавки позволяют изменять как твёрдость, так и величину упругого восстановления покрытия и, соответственно, изменять скорости изнашивания сопряжённых поверхностей деталей.

В связи с тем что коленчатый вал является деталью, определяющей срок службы двигателя до его капитального ремонта, необходимо обеспечить максимальную износостойкость шеек вала, а вкладыши заменяются по мере их изнашивания без вывода двигателя из эксплуатации, поэтому необходимо выбирать критериальные параметры, обеспечивающие минимальную скорость изнашивания шеек.

Выводы

Предлагаемая методология проектирования наноструктурированных композиционных органо-неорганических триботехнических материалов позволяет существенно уменьшить объём экспериментальных исследований благодаря полученным зависимостям износостойкости от химического состава материала и механических характеристик покрытия. Изменяя химический состав и структурные характеристики материалов на основе вермикулита, можно управлять

эксплуатационными свойствами формируемых покрытий и, соответственно, триботехническими характеристиками на этапах формирования покрытия и эксплуатации трибосопряжения.

На этапах формирования покрытия на скорость изнашивания стали наибольшее влияние оказывают химический состав (в частности, величина содержания оксида алюминия), структура (кристаллическая или полиморфная), размер частиц. Следует ограничивать содержание оксида алюминия (оптимальное количество – 4,5–5,2%).

Критериальные значения механических свойств металлокерамического покрытия для обеспечения минимальной величины скорости его изнашивания должны быть: модуль упругости $(1,1\text{--}3,8) \times 10^{-5}$ Н/мм² и величина упругого восстановления $\geq 0,7$.

Получение оптимальных эксплуатационных свойств для обеспечения долговечности и эффективности трибосопряжения (на примере сопряжения «коленчатый вал – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля) может быть достигнуто путём применения композиций и композитов на основе вермикулита для формирования тонкоплёночных износостойких покрытий на стальных поверхностях. Максимальную износостойкость трибосопряжения обеспечивают следующие материалы: композит вермикулит + HCl + 9% ПФС и композиция вермикулит + HCl + производная молибдена.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Л.Б. Леонтьев – разработка концепции исследования и проведение экспериментальных исследований; А.Л. Леонтьев – проведение экспериментальных исследований, анализ и интерпретация результатов исследования; Н.П. Шапкин – разработка и изготовление органо-неорганических материалов; К.А. Молоков – расчёт математических зависимостей; И.Б. Друзь – перевод на английский язык, оформление и редактирование текста.

L.B. Leont'ev – development of the research concept and conducting experimental research; A.L. Leont'ev – conducting experimental studies, analyzing and interpreting research results; N.P. Shapkin – development and manufacture of organo-inorganic materials; K.A. Molokov – calculation of mathematical dependencies; I.B. Druz – English translation, text design and editing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Шапкин Н.П., Макаров В.Н., Молоков К.А., Болотова В.П. Влияние химического состава материала и физико-механических свойств покрытия на износостойкость трибоузла «вал – покрытие – вкладыш подшипника» // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 4. С. 326–329. DOI: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-4-326-329>
2. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Макаров В.Н., Токликишвили А.Г. Триботехнические наноматериалы и надежность судовых дизелей: монография. Владивосток: ДВФУ, 2020. 277 с.
3. Усачев В.В., Погодаев Л.И., Телух Д.М., Кузьмин В.В. Введение в проблему использования природных слоистых геомодификаторов в трибосопряжениях // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 1. С. 36–42.
4. Дунаев А.В., Ладиков В.В., Пустовой И.Ф., Голубев И.Г. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК. Москва: Росинформагротех, 2014. 164 с.
5. Колокатов А.М. Ремонтно-восстановительные составы для повышения ресурса машин. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 215 с.
6. Jaber M., Miehle-Brenble J., Roux M., Dentzer J. and other. A new Al, Mg-organoclay // New J. Chem. 2002. № 26. P. 1597–1600.
7. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П. Проблемы материаловедения в трибологии. Новосибирск: НЭТИ, 1991. 64 с.
8. Кубич В.И., Ивченко Л.И. О механических характеристиках приповерхностных слоев элементов трибосопряжения «шейка – покрытие – вкладыш» // Проблемы трибологии. 2011. № 4. С. 97–102.

REFERENCES

1. Leont'ev L.B., Leont'ev A.L., Shapkin N.P., Makarov V.N., Molokov K.A. and Bolotova V.P. Influence of the coating composition and properties on the wear resistance of "shaft – coating – bearing" systems. *Russian Engineering Research*, 2023, vol. 43, no. 6, pp. 684–687. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2306014X>
2. Leont'ev L.B., Shapkin N.P., Leont'ev A.L., Makarov V.N., Toklikishvili A.G. Tribological nano-materials and reliability of marine diesel engines: Monograph. Vladivostok: FEPU, 2020. 277 p. (In Russ.).
3. Usachev V.V., Pogodaev L.I., Telukh D.M., Kuzmin V.V. Introduction to the problem of using natural layered geomodifiers in tribocouplings. *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*, 2010, no. 1, pp. 36–42. (In Russ.).
4. Dunaev A.V., Ladikov V.V., Pustovoy I.F., Golubev I.G. Efficiency of using mineral modifiers in technical service in the agro-industrial complex: scientific. Edition. Moscow: FGBNU "Rosinformagrotech", 2014. 164 p. (In Russ.).
5. Kolokatov A.M. Repair and restoration compositions for increasing the service life of machines. Moscow: Publishing house of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy, 2016. 215 p. (In Russ.).
6. Jaber M., Miehle-Brenble J., Roux M., Dentzer J. and other. A new Al, Mg-organoclay. *New J. Chem.*, 2002, no. 26, pp. 1597–1600.
7. Tushinskiy L.L., Poteriaev Yu.P. Problems of materials science in tribology. Novosibirsk: NETI, 1991. 64 p. (In Russ.).
8. Kubich V.I., Ivshchenko L.I. On the mechanical characteristics of the near-surface layers of the tribocoupling elements "shaft neck – coating – liner". *Problems of Tribology*, 2011, no. 4, pp. 97–102. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Леонтьев Лев Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор Департамента промышленной безопасности Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ leontyev.l.b@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8072-306X>

Lev B. Leont'ev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Industrial Safety of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Леонтьев Андрей Львович – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Остов Констракшен» (Владивосток, Российская Федерация),

✉ gfi25leontev@mail.ru

Andrey L. Leont'ev, Candidate of Technical Sciences, general manager Limited liability company "Ostov Construction" (Vladivostok, Russian Federation).

Шапкин Николай Павлович – доктор химических наук, профессор, профессор Департамента химии и материалов, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

✉ npshapkin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4287-8917>

Nikolai P. Shapkin, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Chemistry and Materials, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Молюков Константин Александрович – кандидат технических наук, доцент Департамента промышленной безопасности Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ spektrum011277@gmail.com

Konstantin A. Molokov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Safety of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Друзь Иван Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры основы инженерного проектирования, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского (Владивосток, Российская Федерация),

✉ druz_i_b@mail.ru

Ivan B. Druz, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Fundamentals of Engineering Design, Maritime State University named after the admiral G.I. Nevelskoy (Vladivostok, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 09.03.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 13.05.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА
И ОРГАНИЗАЦИИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья
УДК 621.791.14:62-97
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/75-83>

**Водоохлаждаемый инструмент для сварки трением
с перемешиванием**

Владимир Николаевич Стаценко✉, **Константин Владимирович Бернавский**

Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация,
✉ vladsta@mail.ru

Аннотация. Инструмент для сварки трением с перемешиванием закрепляется в патроне специализированного станка. После включения вращения инструмента и начала процесса сварки через входной патрубок подаётся охлаждающая вода на рабочие лопасти инструмента, которые при вращении инструмента аналогично действию центробежного насоса под действием центробежных сил нагнетают воду в спиралевидный канал и затем – в выходной патрубок. При этом вода охлаждает лопасти и внутреннюю часть заплечика. Расчётные исследования показывают, что при увеличении необходимого снижения температуры рабочей поверхности заплечика отводимая к охлаждающей воде тепловая мощность повышается, с уменьшением толщины заплечика это повышение происходит более значительно. При необходимом снижении температуры на 200 °С при толщине заплечика $\delta = 20$ мм расход воды должен составлять 0,25 г/с, при толщине $\delta = 5$ мм этот расход повышается до 0,6 г/с. При необходимом снижении температуры на 400 °С при толщине заплечика $\delta = 20$ мм расход воды пропорционально повышается до 0,75 г/с, при толщине $\delta = 5$ мм этот расход увеличивается до 1,7 г/с.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, инструмент, охлаждение, температура заплечика, тепловая мощность, толщина заплечика, расход воды

Для цитирования: Стаценко В.Н., Бернавский К.В. Водоохлаждаемый инструмент для сварки трением с перемешиванием // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 75–83.

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR
AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Original article

Water cooled friction stir welding tool

Vladimir N. Statsenko✉, **Konstantin V. Bernavsky**

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation,
✉ vladsta@mail.ru

Abstract. The friction stir welding tool is fixed in the chuck of a specialized machine. After the tool rotation is switched on and the welding process begins, cooling water is supplied to the tool working blades through the inlet pipe, which, when the tool rotates, similarly to the action of a centrifugal pump, under the action of centrifugal forces, pump water into the spiral channel and then into the outlet pipe. In this case, the water cools the blades and the inner part of the shoulder. Calculation studies show that with an increase in the required decrease in the temperature of the shoulder working surface, the thermal power transferred to the cooling water increases, with a decrease in the shoulder thickness this increase is more significant. With the required temperature decrease by 200 °C with a shoulder thickness of $\delta = 20$ mm, the water consumption should be 0,25 g/s,

with a thickness of $\delta = 5$ mm this consumption increases to 0,6 g/s. With the required temperature reduction by 400°C at a shoulder thickness of $\delta = 20$ mm, the water consumption increases proportionally to 0,75 g/s, at a thickness of $\delta = 5$ mm, this consumption increases to 1,7 g/s.

Keywords: friction stir welding, tool, cooling, shoulder temperature, thermal power, shoulder thickness, water consumption

For citation: Statsenko V.N., Bernavsky K.V. Water cooled friction stir welding tool. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 75–83. (In Russ.).

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является достаточно новой технологией, реализованной в современном виде в 1991 г. [1]. Этот способ сварки стал широко использоваться в разных областях промышленности для соединения сплавов, плохо свариваемых традиционными способами (алюминиевые сплавы, содержащие цинк, медь, литейные сплавы магния).

Специальный инструмент состоит из заплечика и рабочего выступа – пина [1]. Вращающийся инструмент закрепляют в шпинделе специализированного станка, включают вращение инструмента и медленно погружают его встык свариваемых пластин до тех пор, пока заплечик инструмента не углубится на 0,2–0,3 мм в основной металл. Включается продольное перемещение инструмента вдоль стыка со скоростью сварки, в результате трения пина и заплечика о заготовку выделяется теплота, которая доводит металл вокруг инструмента до пластифицированного состояния. При перемещении инструмента происходит перемешивание и перенос металла с формированием сварного шва.

Качество сварного соединения зависит от степени перемешивания пластифицированных кромок свариваемых деталей, которая, в свою очередь, зависит от температуры размягчённого металла. Эту температуру можно получить разными сочетаниями скоростей вращения инструмента, перемещения (сварки), силы прижатия инструмента.

Таблица 1 / Table 1

Цвета каления
Incandescence colors

Температура, °C	Цвет каления	Цвет
800	ярко- или светло-вишнёвый	
850	ярко- или светло-красный	
900	ярко-красный	
950	оранжевый	
1000	жёлтый	
1100–1150	ярко- или светло-жёлтый	
1200	жёлто-белый	
1300 и более	белый	

Для сварки алюминиевых сплавов методом СТП достаточно температуры кромок свариваемых пластин 500–550°C [6], магниевых – 450–520°C, медных – 750–850°C. При этом температура инструмента может достигать значений на 100–150°C выше. Для сварки медных сплавов (рис. 1) температуру инструмента можно оценить по цвету каления (табл. 1), она может составлять 900–950°C.

При этих температурах резко увеличивается износ инструмента, сокращается его ресурс. Для улучшения этих характеристик инструмента используются термостойкие стали и сплавы (табл. 2), обычно достаточно редкие и дорогостоящие. В особенных условиях этого ресурса может быть достаточно для выполнения нескольких метров сварного шва.



Рис. 1. Сварка трением с перемешиванием пластин из медного сплава

Fig. 1. Friction stir welding of copper alloy plates

Таблица 2 / Table 2

Материал инструмента [2]

Tool material [2]

Сплав	Толщина (мм)	Материал инструмента
Алюминиевые сплавы	< 12	Инструментальная сталь, WC-Co*
	< 26	MP159 (никель-кобальтовый сплав)
Магниеые сплавы	< 6	Инструментальная сталь, WC**
Медь и медные сплавы	< 50	Никелевые сплавы, вольфрамовые сплавы, поликристаллический кубический нитрид бора (ПКНБ)
	< 11	Инструментальная сталь
Титановые сплавы	< 6	Вольфрамовые сплавы
Нержавеющие стали	< 6	ПКНБ, вольфрамовые сплавы
Низколегированные стали	< 10	WC, ПКНБ
Никелевые сплавы	< 6	ПКНБ

* WC-Co – композиционный материал, карбид вольфрама на кобальтовой матрице

** WC – карбид вольфрама

Используемые технические решения

Для уменьшения износа инструмента и увеличения его ресурса применяется жидкостное (водяное) охлаждение инструмента.

Одним из известных устройств по охлаждению инструмента для сварки трением с перемешиванием является система гравитационной тепловой трубы [3]. Инструмент имеет цилиндрический корпус с внутренней полостью, имеющей форму усеченного конуса с основанием большего диаметра в горячей зоне (зоне испарения хладагента) и меньшего диаметра в зоне охлаждения (зоне конденсации паров хладагента). Корпус инструмента снаружи в зоне конденсации имеет охлаждение проточной жидкостью, подаваемой принудительным способом.

В рабочем состоянии при вращении инструмента рабочая поверхность заплечика нагревается, хладагент во внутренней полости в горячей зоне испаряется, его пар поступает в верхнюю часть полости в зону охлаждения, конденсируется и затем в виде плёнки стекает по конусной стенке в нижнюю часть инструмента обратно в горячую зону (рис. 2а), т.е. происходит замкнутая циркуляция хладагента через зоны нагрева и охлаждения.

Недостатки этого устройства:

1. В инструментах для сварки трением с перемешиванием диаметр заплечика имеет обычно размер 20–25 мм. К инструменту приложена значительная нагрузка в виде крутящего момента и силы его прижатия к свариваемым деталям. Следовательно, стенки внутренней полости должны иметь значительную толщину, соответственно, эта полость будет иметь неболь-

шие размеры и объём, в котором разместится всего 2–3 мл хладагента. Для переноса достаточного количества теплоты этого количества хладагента явно недостаточно.

2. Сложная система принудительного жидкостного охлаждения наружной поверхности верхней части корпуса вращающегося инструмента (на схеме не указано), что приводит к протечкам жидкости и негативному влиянию на температурный режим в зоне сварки деталей.

Другим устройством охлаждения является инструмент с цилиндрической полостью (1), в которой по внутренней цилиндрической поверхности по всей высоте выполнены винтовые канавки (2), при этом направление канавок выбрано таким образом, чтобы при вращении инструмента охлаждающая жидкость за счёт центробежных сил прижималась к стенкам канавок и по канавкам поднималась вверх [4]. Для повышения эффективности теплоотвода в верхней части цилиндрического корпуса на его внешней стороне установлены рёбра (3), выполняющие функцию радиатора (рис. 2b).

Недостатки этого устройства:

1. Винтовые канавки при вращении инструмента предназначены для перекачивания потока хладагента из горячей зоны в верхнюю часть корпуса. Однако в тексте также указано, что полость внутри инструмента заполнена охлаждающим быстроиспаряющимся хладагентом. Непонятно, жидкость перемещается вверх по канавкам или испаряется. Если жидкость всё-таки перемещается по канавкам вверх, то как она возвращается назад в нижнюю часть инструмента (канал для прохода) – не указано. По схеме, видимо, вся жидкость при вращении поднимается по канавкам вверх и процесс охлаждения прекращается.

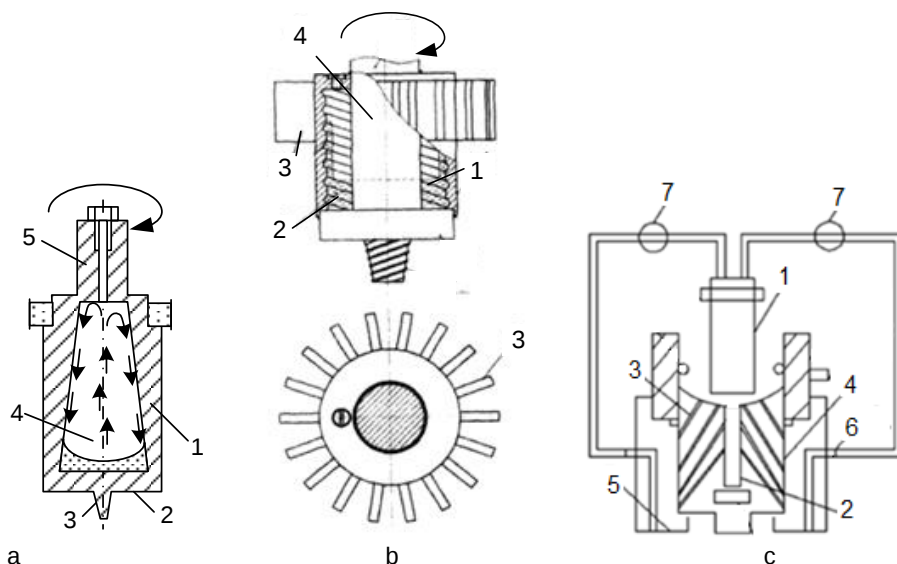


Рис. 2. Системы охлаждения инструмента для сварки трением с перемешиванием

Fig. 2. Cooling systems for friction stir welding tools

1. В инструментах для сварки трением с перемешиванием диаметр заплечика имеет обычно размер 20–25 мм. Диаметр хвостовика должен иметь значение не менее 10 мм, чтобы передать на заплечик и пин крутящий момент и осуществить значительное прижатие его к свариваемым деталям. Тогда зазор между корпусом с винтовыми канавками (2) и хвостовиком (4) будет иметь значение 2–3 мм. В этом случае объём заливаемого в полость инструмента охлаждающего хладагента должен составлять всего 2–3 мл. Для переноса достаточного количества теплоты этого количества хладагента явно недостаточно.

2. И основное. При высоких температурах заплечика при сварке (при сварке наиболее низкотемпературных алюминиевых сплавов температура под заплечиком может достигать значений 520–550°C) охлаждающий хладагент, скорее всего, мгновенно вскипит с образованием пара высокого давления. Передача теплоты через пар и теплопроводностью, и конвекцией ниже, чем через жидкость, примерно в 10–100 раз. Соответственно, процесс охлаждения заплечика в этом случае резко снижается.

Проточная схема охлаждения инструмента для сварки трением с перемешиванием реализована в системе, представленной в [5]. Хладагент принудительно через распылитель (1) направляется в коллектор (2) и несколько каналов (3) внутри тела инструмента (4), охлаждает его, затем нагретый хладагент собирается в кольцевом сборнике жидкости (5) вокруг вращающегося инструмента (4). Из сборника (5) хладагент по трубкам (6) снова принудительно нагнетателем (7) направляется через распылитель (1) в коллектор (2) и каналы (3) охлаждения инструмента (4).

Недостатки этого устройства:

1. Отсутствует система охлаждения хладагента, что приводит к постепенному повышению температуры хладагента и снижению качества охлаждения.
2. Большое количество каналов внутри инструмента нарушает его прочность.
3. Непонятна система подвода силы прижатия инструмента к свариваемым деталям и организация подвода к инструменту крутящего момента. Эти факторы являются главенствующими в технологии сварки трением с перемешиванием.

Предлагаемое техническое решение

Для уменьшения износа инструмента и увеличения его ресурса предлагается применить жидкостное (водяное) охлаждение инструмента со стороны, обратной рабочей поверхности заплечика.

Сущность нашего предложения заключается в использовании проточной схемы охлаждения инструмента, которая представлена на рис. 3. Водоохлаждаемый инструмент с заплечиком (1) и рабочей поверхностью (2), пином (3), приводным валом (4) и хвостовиком (5) закрепляется в патроне станка (на схеме не указано). Заплечик (1) имеет круговой паз (6) и внутреннюю часть (7) с рабочими лопатками (8). Рабочий инструмент помещён в корпус (9), который имеет патрубок (10) входа жидкости, внутреннюю полость (11) для прохода охлаждающей жидкости, спиралевидный канал (12) выхода жидкости за лопатками (8) и патрубок (13) выхода жидкости, корпус со стороны рабочей поверхности инструмента закрыт крышкой (14), входящей в круговой паз (6), крышка (14) скрепляется с корпусом (9) болтовым соединением (15) через прокладку (16) и отверстия (17). Корпус со стороны хвостовика (5) приводного вала (4) закрыт сальниковым уплотнением, состоящим из нажимной втулки (18) с резьбой (19) и сальниковой мягкой набивки (20), для закрепления корпуса используется кронштейн (21).

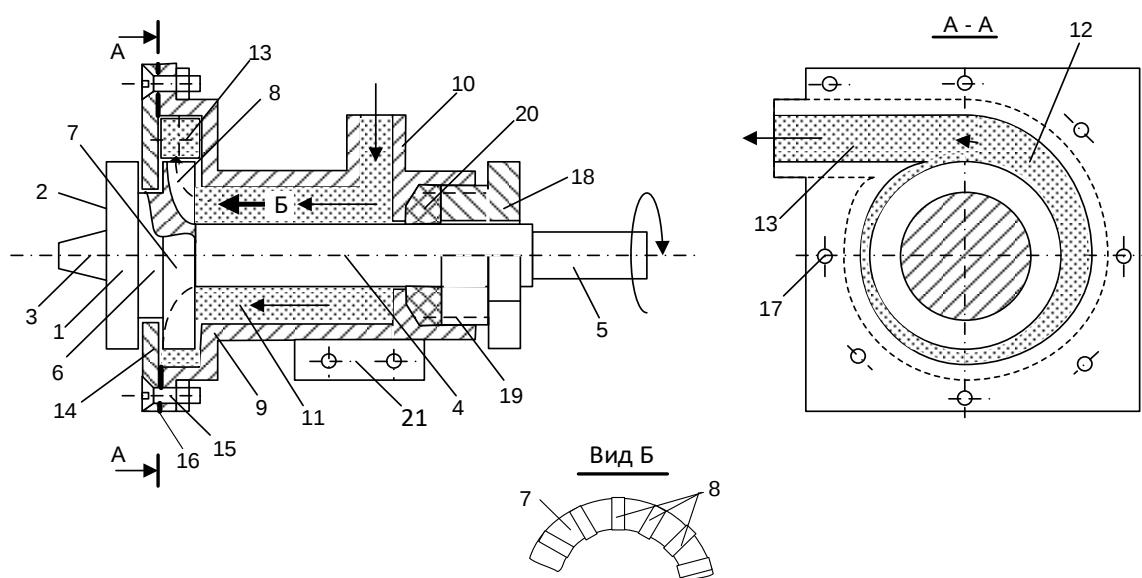


Рис. 3. Устройство водоохлаждаемого инструмента для сварки трением с перемешиванием

Fig. 3. Water-cooled tool design for friction stir welding

Предлагаемое устройство работает следующим образом.

Инструмент для сварки трением с перемешиванием закрепляется хвостовиком (5) в патроне специализированного станка. Корпус инструмента (9) через кронштейн (21) закрепляется неподвижно относительно устройства привода патрона станка (не указано). После включения вращения инструмента и начала процесса сварки в патрубок (10) подаётся охлаждающая вода, которая проходит по внутренней полости (11) и поступает в рабочие лопатки (8), которые при вращении инструмента аналогично действию центробежного насоса под действием центробежных сил нагнетают воду в спиралевидный канал (12) и затем – в выходной патрубок (13). При этом при контакте с лопатками (8) и внутренней частью заплечика (7) вода охлаждает эти поверхности и интенсивно нагревается до температуры 90°C , эта температура ограничивает возможность вскипания воды при давлении около 100 кПа.

Особенностью этой схемы является наличие эффекта эжекции при струйном движении воды из рабочих лопаток (8) в спиралевидный канал (12), при котором происходит подсос воздуха через щель между круговым пазом (6), внутренней частью заплечика (7) и крышкой (14). При этом исключаются протечки охлаждающей воды на заплечик (1) и его рабочую часть (2), что не влияет на процесс сварки.

Расчётное исследование теплообмена в инструменте

При исследовании точечной сварки трением с перемешиванием авторами получены зависимости удельного тепловыделения на инструменте от его угловой скорости вращения при обработке алюминиевого сплава АМг3 (рис. 4а) [6]. Для инструмента с диаметром заплечика 20 мм при угловой скорости его вращения $\omega = 100 \text{ c}^{-1}$ тепловыделение может составлять $Q = 0,75 \text{ кВт}$.

Авторами проведены расчётные исследования теплообмена при охлаждении водой заплечика вращающегося инструмента. Упрощённая расчётная схема теплообмена между рабочей поверхностью заплечика с температурой t_3 и охлаждающей водой с температурами t_{B1} на входе и t_{B2} на выходе приведена на рис. 4б.

В расчётах назначена температура воды на входе $t_{B1} = 20^{\circ}\text{C}$, температура воды на выходе $t_{B2} = 90^{\circ}\text{C}$ принята из условия исключения вскипания воды в результате нагрева. Кроме этого, задавались несколькими значениями величины снижения температур рабочей поверхности заплечика (в диапазоне $\Delta t_3 = 100\text{--}500^{\circ}\text{C}$), а также несколькими значениями толщин заплечика ($\delta = 5, 10, 15$ и 20 мм), материал заплечика выбран в виде инструментальной стали с коэффициентом теплопроводности $\lambda_3 = 0,06 \text{ кВт/м}\cdot\text{К}$.

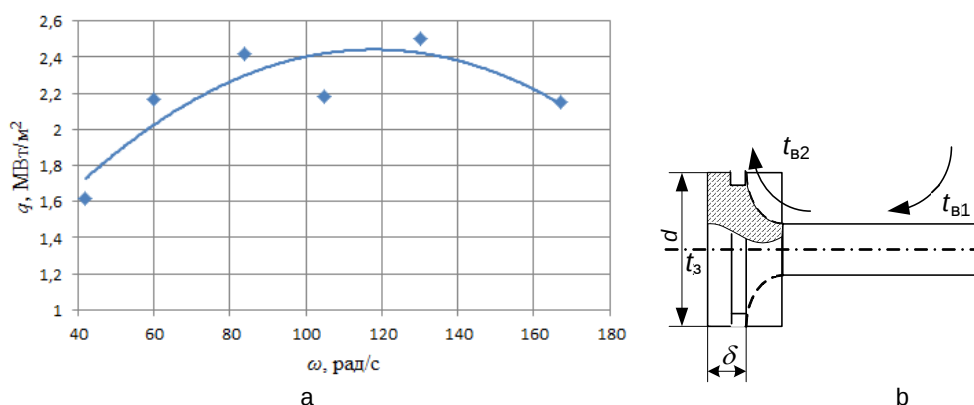


Рис. 4. Удельное тепловыделение на инструменте (а), упрощённая расчётная схема теплообмена (б)

Fig. 4. Specific heat generation on the tool (a), simplified heat exchange calculation scheme (b)

Коэффициент теплоотдачи от вращающейся поверхности заплечика к воде с температурой t_{B2} рассчитаны по критериальным зависимостям [7, 8] (при $Re < 3 \cdot 10^3$):

$$Nu = 0,62Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33},$$

$$Re = \frac{\omega \cdot (d/2)^2}{\nu_B},$$

$$Nu = \frac{\alpha(d/2)}{\lambda_B},$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{(d/2)},$$

где ω – угловая скорость вращения заплечика, с^{-1} ;
 ν_B ($\text{м}^2/\text{с}$), λ_B ($\text{кВт}/\text{м} \cdot \text{К}$) – коэффициенты кинематической вязкости и теплопроводности воды при температуре t_{B2} ;
 α – коэффициент теплоотдачи, $\text{кВт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;
 Pr – критерий Прандтля для воды при температуре t_{B2} ;
 Nu – критерий Нуссельта.

Результаты расчёта коэффициента теплоотдачи в зависимости от угловой скорости вращения заплечика представлены на рис. 5а. В расчётах коэффициент теплоотдачи выбран для скорости вращения заплечика $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ – $\alpha = 8,4 \text{ кВт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Коэффициент теплопередачи от рабочей поверхности заплечика к охлаждающей воде с температурой $t_{B2} = 90^\circ\text{C}$ рассчитан по зависимости [8]:

$$k = \frac{1}{\frac{\delta}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha}}, \text{ кВт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Результаты расчёта коэффициента теплопередачи в зависимости от толщины заплечика представлены на рис. 5б.

В расчётах рассматривается изменение характеристик теплообмена при изменении температуры рабочей поверхности заплечика от значения t_{31} до t_{32} . Соответствующее изменение удельного теплового потока через стенку заплечика от рабочей поверхности к охлаждающей воде рассчитывается по зависимости:

$$q = k(t_{31} - t_{B2}) - k(t_{32} - t_{B2}) = k(t_{31} - t_{32}), \text{ кВт}/\text{м}^2,$$

а изменение тепловой мощности, отводимой на нагрев воды (и охлаждение заплечика), рассчитывается по зависимости:

$$Q = q \cdot S, \text{ кВт},$$

где $S = \pi \cdot d^2/4$ – площадь рабочей поверхности заплечика, м^2 ;
 d – диаметр заплечика, м.

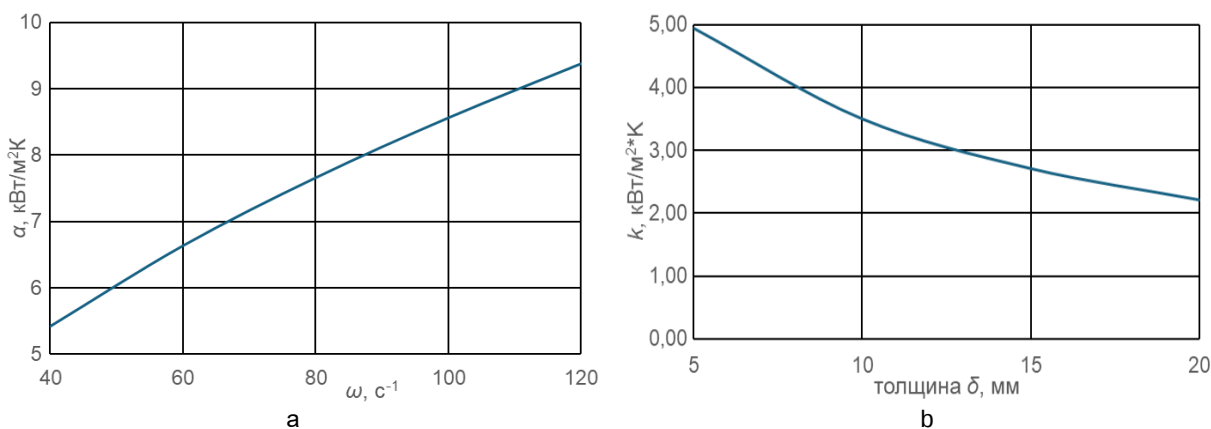


Рис. 5. Зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости вращения заплечика, $d = 0,02$ м (а), и коэффициента теплопередачи от толщины заплечика (б)

Fig. 5. Dependences of the heat transfer coefficient on the rotation speed of the shoulder, $d=0.02$ m (a), and the heat transfer coefficient on the thickness of the shoulder (b)

Результаты расчёта тепловой мощности, отводимой через заплечик, в зависимости от необходимого снижения температуры его рабочей поверхности Δt_3 представлены на рис. 6а.

Из этого значения находится изменение расхода охлаждающей воды:

$$G_B = Q / (c_p \cdot \Delta t_B), \text{ кг/с},$$

где $c_p = 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$ – теплоёмкость воды;

$\Delta t_B = t_{B2} - t_{B1} = 70^\circ\text{C}$ – разница температур охлаждающей воды на выходе и входе.

Результаты расчёта зависимости изменения расхода охлаждающей воды от величины снижения температуры на рабочей поверхности заплечика при разной его толщине представлены на рис. 6б.

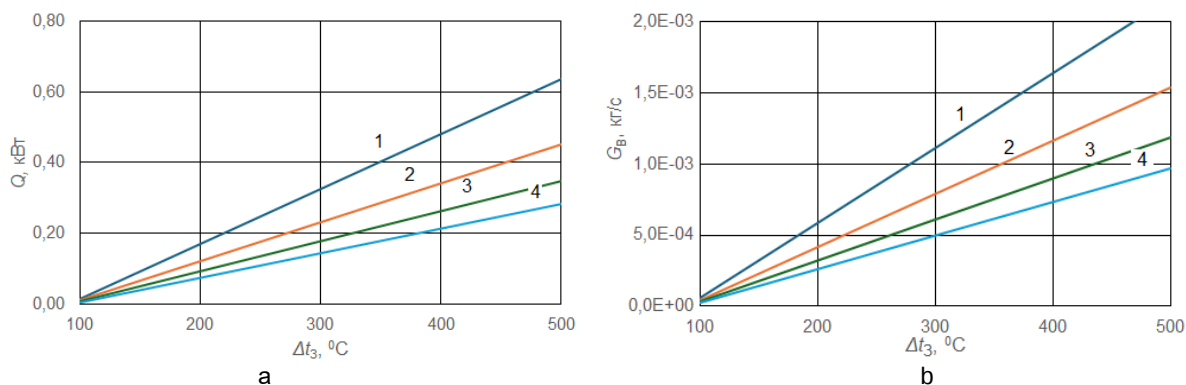


Рис. 6. Изменение тепловой мощности на охлаждение заплечика (а), расход воды (б) от величины снижения температуры рабочей поверхности заплечика, $c_p = 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$, $\lambda_3 = 0,06 \text{ кВт/м}\cdot\text{К}$, $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$, $d = 0,02 \text{ м}$: 1 – $\delta = 5 \text{ мм}$, 2 – $\delta = 10 \text{ мм}$, 3 – $\delta = 15 \text{ мм}$, 4 – $\delta = 20 \text{ мм}$

Fig. 6. Change in thermal power for cooling the shoulder (a), water consumption (b) from the value of the temperature decrease of the working surface of the shoulder,

$c_p = 4.19 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, $\lambda_3 = 0.06 \text{ kW/m}\cdot\text{K}$, $\omega = 100 \text{ s}^{-1}$, $d = 0.02 \text{ m}$:
1 – $\delta = 5 \text{ mm}$, 2 – $\delta = 10 \text{ mm}$, 3 – $\delta = 15 \text{ mm}$, 4 – $\delta = 20 \text{ mm}$

Закключение

Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении необходимого снижения температуры рабочей поверхности заплечика отводимая к охлаждающей воде тепловая мощность повышается, с уменьшением толщины заплечика это повышение происходит более значительно. При необходимом снижении температуры на 200°C при толщине заплечика $\delta = 20 \text{ мм}$ расход воды должен увеличиться на $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$, при толщине $\delta = 5 \text{ мм}$ этот расход повышается на $6 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$. При необходимом снижении температуры на 400°C при толщине заплечика $\delta = 20 \text{ мм}$ расход воды пропорционально повышается на $0,75 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$, при толщине $\delta = 5 \text{ мм}$ этот расход увеличивается на $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.Н. Стаценко – постановка задач исследования, разработка методики расчётов, оформление статьи; К.В. Бернавский – анализ литературных источников, расчётные исследования, редактирование текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

V.N. Statsenko – formulation of research problems, processing of experimental results, preparation of the article; K.V. Bernavsky – analysis of literary sources, analysis and interpretation of results, preparation and editing of text. All authors read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. Friction stirs butt welding. GB Patent № 9125978.8. International patent application PCT/GB92/02203. 1991.
2. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений // Сварочное производство. 2007. № 10. С. 25–32.
3. Штрикман М.М. Инструмент для фрикционной сварки перемешиванием // Патент на изобретение № RU 2517653, заявка № 2012155481/02, приоритет от 20.12.2012, дата регистрации 27.05.2014 г.
4. Албагачиев А.Ю., Прохорович В.Е., Михеев А.В., Абубакиров А.В. Самоохлаждающийся инструмент для сварки трением с перемешиванием расплава свариваемых деталей // Патент на изобретение № RU 216182, заявка № 2022126473, приоритет от 11.12.2017, дата регистрации 20.01.2023 г.
5. Circulating water cooling stirring friction welding device // Патент на изобретение № 201711307038.3, Китай, заявка № 108015406, приоритет от 11.12.2017, дата регистрации 11.05.2018 г.
6. Стаценко В.Н. Тепловые процессы при сварке трением с перемешиванием: монография. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. 120 с. DOI: <https://doi.org/10.24866/7444-5191-2>
7. Степыгин В.И., Фурсов В.М. К расчёту теплоотдачи от вращающихся дисковых поверхностей // Известия вузов. Пищевая технология. 1990. № 4. С. 10–11.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. Москва: Энергия, 1975. 488 с.

REFERENCES

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. Friction stirs butt welding. GB Patent № 9125978.8. International patent application PCT/GB92/02203. 1991.
2. Shtrikman M.M. Status and development of the process of friction welding of linear joints. *Welding production*, 2007, no. 10, pp. 25–32. (In Russ.).
3. Shtrikman M.M. Tool for friction stir welding // Patent for invention. No. RU 2517653, application No. 2012155481/02, priority from 20/12/2012, registration date 27/05/2014. (In Russ.).
4. Albagachiev A.Yu., Prokhorovich V.E., Mikheev A.V., Abubakirov A.V. Self-cooling tool for friction stir welding of welded parts // Patent for invention. No. RU 216182, application No. 2022126473, priority dated 12/11/2017, registration date 01/20/2023. (In Russ.).
5. Circulating water cooling stirring friction welding device // Patent for invention. No. 201711307038.3, China, application No. 108015406, priority dated 12/11/2017, registration date 05/11/2018.
6. Statsenko V.N. Thermal processes in friction stir welding. Vladivostok, Publishing House of FEFU, 2021. 120 p. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/7444-5191-2>
7. Stepygin V.I., Fursov V.M. On the calculation of heat transfer from rotating disk surfaces. *News of higher education institutions. Food technology*, 1990, no. 4, pp. 10–11. (In Russ.).
8. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. Textbook for higher education institutions. Moscow: Energiya, 1975. 488 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Стаценко Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ vladsta@mail.ru

Vladimir N. Statsenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Бернавский Константин Владимирович – магистрант, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

✉ bernavsky@mail.ru

Konstantin V. Bernavsky, Postgraduate Student, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 07.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 06.06.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

Научная статья

УДК 624.012

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/84-93>

Опалубка железобетонных оболочечных конструкций: проектирование и строительство

Хабте Йоханнес Дамир[✉], Марина Игоревна Рынковская, Иссайас Андай Сереке

Российский университет дружбы народов,

Москва, Российская Федерация

✉ khabtej@oiate.ru

Аннотация. Строительство железобетонных оболочечных конструкций ведётся уже более века, в результате чего получают очень популярные архитектурные произведения. Однако интерес архитекторов и инженеров к оболочечным конструкциям, похоже, сошёл на нет из-за трудностей, связанных с опалубкой, и других различных причин. Хотя с развитием цифровых технологий строительство оболочечных конструкций, казалось бы, возобновилось, использование бетонных оболочечных конструкций всё ещё остаётся отстающим, с нерешёнными трудностями. Цель данной статьи – выявить основные трудности при строительстве бетонных оболочек и предложить их решение. Методы, используемые в статье, включают в себя аналитическое и экспериментальное моделирование. Предложенный прототип бетонной купольной оболочечной конструкции спроектирован и построен в масштабе экспериментальной конструкции. Полученные результаты подтверждают, что использование гибкой и многоразовой опалубочной мембраны может быть решением для различных кривых в структуре оболочки. Рекомендуются дальнейшие прогрессивные исследования для улучшения её характеристик и эффективности.

Ключевые слова: оболочечная конструкция, бетонные оболочки, регулируемая опалубка, многоразовая опалубка

Для цитирования: Дамир Х.Й., Рынковская М.И., Сереке И.А. Опалубка железобетонных оболочечных конструкций: проектирование и строительство // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 84–93.

Original article

Formwork of concrete shell structures: design and construction

Habte Yo. Damir[✉], Marina I. Rynkovskaya, Issaias A. Sereke

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation

✉ khabtej@oiate.ru

Abstract. Construction of concrete shell structures has been exercised for more than a century producing very popular architectural works. And the interest of architects and engineers on shell structures seemed to have demised due to the difficulties related to formwork among other various reasons. Although, with advancements of digital technologies, shell structures construction seemed to resume, the use of concrete shell structures still remains lagging behind with unresolved difficulties. The objective of this paper is to identify the main difficulties with concrete shell construction and propose a solution. The method used in this study is analytical and experimental modelling. A proposed prototype concrete dome shell structure is designed and constructed to scaled experimental structure. And the findings confirm that the use of flexible and reusable formwork membrane can be a solution for various curves in a shell structure. And further progressive studies are recommended to refine it for better performances and effectiveness.

Keywords: shell structure, concrete shells, adjustable formwork, reusable formwork

For citation: Damir H.Yo., Rynkovskaya M.I., Sereke I.A. Formwork of concrete shell structures: design and construction. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 84–93. (In Russ.).

Introduction

Concrete Shells

Thin concrete shells have long been used as structural components both from material conservation and aesthetic purposes [1]. Apart from its compressive strength to cover large spans, the concrete capacity to fit any mould and shape makes it attractive for the construction of shell structures. In the early years of the 20th century, shoeboxes, fans and houseshoe concrete shapes were commonly dominating [2]. And during those early years, material abundance and low labour cost were the main drivers of interests on concrete shell structure construction [3]. Later on, the advancements on digital and computer technologies, construction techniques and alternate material developments, enhanced the use of concrete in the futuristic curved surface structures. The period of 1925–1975 is stated to be the 5 golden decades for the popularity of concrete shell construction. Nevertheless, from the 1960s forwards concrete shells started to lose popularity mainly due to increasing costs of labour [4]. Moreover, the decrease in the construction of concrete shell was mostly connected with the cost of formworks and developments of competing materials such as steel and glass [5]. Furthermore, with the needs to meet the demands of 21st century architectural aesthetics, the fast developments of modelling and digital technologies [4], is prompting the rise of concrete shell popularity [6]. However, computer technologies can only make designing and drawing of complex forms easier, while the translation of designs in to real world projects remains with its difficulties [7]. And this paper is designed to experiment the application of a reusable surface membrane for formworks of curved surface.

Formwork of Concrete Shells

During the period of 1930–1950s, majority of the formworks used to support curved surface concrete structures were wooden materials [8], which is characterized to be complex and high skill labour demanding (Fig. 1).



Fig. 1. Wooden Formwork of 93x52 m for shell in Chiasso, Switzerland
(Photo credit: Aurelio Muttoni)

The challenges of curved surface formworks are also governed by stability and safety issues against collapse [9, 10], as curved formworks created from the assemblage of material pieces are also vulnerable to horizontal sliding of failures [11, 12]. Furthermore, material wastages from shell structure formwork construction demands significant consideration. The study of Shen et. al [13] on wastages of construction reveals that timber formwork for foundation is executed with a loss of its 20% as wastage. Material waste resulted from formworks of curved surface or complex geometries is a significant challenge for the concrete construction [14]. The fact that 49% of the total cost of the construction of Centro Ovale, in Chiasso, Switzerland, was consumed by the formworks and falseworks [8], emphasizes how costly is the conventional formwork system.

For economic resource use, the devise of reusable, flexible and adjustable formwork is demanding to solve the major difficulties of many of the curved surface construction [7]. A number of researches and experiments have been so far conducted to overcome the curved surface formwork difficulties. The use of deployable (reusable) formwork is one among the others. A gridshells structure, first introduced by Russian engineer Shukhov Vladimir [4], is a system of reusable and adjustable supporting formwork, followed by the use of carbon fiber gridshell [11] and deformable gridshell [15]. The final result of the deformable gridshell, however, illustrated a flexible nature over the gridshell was observed during concrete casting. the casting is noted to be studied and addressed further.

Moreover, fabrics formworks made from various textile membranes such as Polyolefin, Nylon and Polypropylene have been used as non-conventional formworks [4]. Another innovative approach is the use of pneumatic (inflatable) formwork which is based on air inflation to air tight membrane [15]. In many cases, when this method was used to support large amounts of concrete, a significant deformation was noticed. As large amounts of concrete supported by this method are likely to induce significant deformations during casting, use of supplementary segments was demanding. Another limitation of this method is that the span of the structure is determined by the prefabricated membrane size which demands supplemented by additional conventional scaffoldings [16, 17]. Furthermore, all shapes to be casted by the use of membrane or textile formwork, which relies on viscous pressure, can only be of convex (positive) surfaces [7]. And it can be noticed that all the above investigated papers show that pneumatic (inflated) formwork to be practiced on convex or doom shaped curves only. Tang [18] argues that the use of pneumatic formwork did not gain significant popularity for its limitation to specific domed morphology which results space planning and furniture usage difficulties. A comprehensive discussion of the pneumatic formwork can be referred from Kromoser and Huber [19].

This method represents the latest and economic technology of forming manufactured foam moulds using CNC machines which historically was used to be made by hand [20]. The light weight, cheaper costs, easy milling, demoulding possibilities are the advantages of using this method. The main limitation of this method is that the formwork is extensive for large projects in which the direct reuse lacks thereby producing more wastes.

Huijben et al [4], conducted an experimental study on the application of vacuumatic structures which consists structural aggregates tightly packed in an envelope of flexible membrane.

There is a possibility of fabrication an environmentally friendly and efficient construction technology of curved surface formworks with lesser wastages of materials using the 3D printed bending technology [21]. The printing and robotic mechanism are, however, in their initial development stages in which various limitation such as economic, material recycling and sustainably are yet to be solved [22–24]. Moreover, the available experiments performed yet are limited to prototypes without large scale experiments [25].

Finally, the adjustable and flexible formwork moulds are being studied for practical feasibility. In the 1960s Renzo Piano showed up with an innovative electronic machine that can determine the height of every point of a given curved structure based on a scale model shell [26]. The invention, however, was never used in real world practices for the limitations of force analysis of that period. Most of the later developed adjustable formworks for curved surfaces were based on the principle of Renzo Piano. For example, the adjustable mould developed by the study of M. van Roosbroeck [27].

Another performance towards an adjustable mould was the idea of strip mould which is based on the arrangements of vertical pins covered by flexible smooth bed. The strip mould proposed and designed by H. Jansen demonstrates a double curved surface arranged by strips of vertical pins covered by strips of thin wood layers and rubber mat (Fig. 2).

The main limitations of this arrangement are that the distance between pins is significantly associated with the radii of curvatures and stiffness of the layers. This means the flexibility of the arrangement would be limited. The first adjustable mould developed by D. Rietbergen [26] was executed in such a way that a computer program can be used for the proposed automatic set up. Nonetheless, this development was confined to small scale tests. Similarly, a pin bed mould was developed which consists of vertical pistons of adjustable height to be covered by a flexible layer. Van

Roosbroeck [27] prepared a mould which can produce curved concrete of size not greater than 4.5x3.38 m and only up to 1.5 m of curvature. And this is accompanied with practical limitations in which large number of pin arrangements would be required in small areas (Fig. 3).

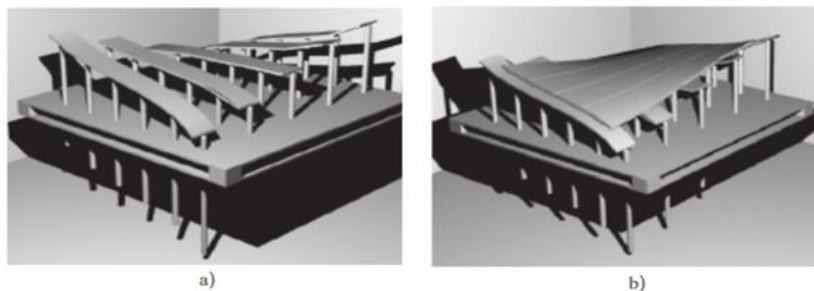


Fig. 2. Two strip mould designed by H. Jansen:
a) one layer strip; b) two layer strip mould

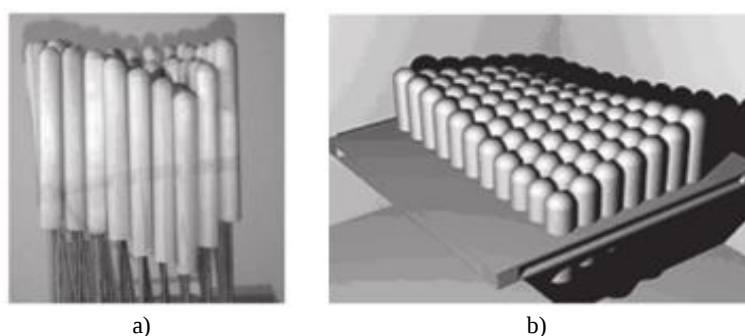


Fig. 3. Pin bed moulds:
a) by M. Van Roosbroeck; b) by Hans Jansen

Finally, the above-mentioned studies and practices demonstrate that the implementation of adjustable mould has not yet reached the verge of producing real world curved surfaces of concrete shell formworks [28].

That is where this paper focuses to conduct an experimental study on devising a reusable and adjustable formwork structure for curved surface concrete structures.

Methodology

The hypothesis of this paper for feasible use of the adjustable and re-usable formwork is tested by practical construction experiments.

Practical prototype formwork of a dome shape and concrete casting were conducted. The model of the concrete dome shell experimented has a thickness of 7 cm with the dome dimensions denoted in Fig. 4.

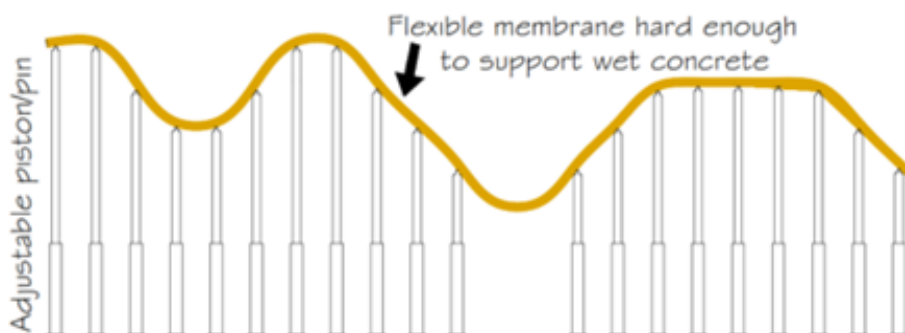


Fig. 4. Rigidity of formwork membrane and spaces of vertical supports
In this study, an arrangement, timber panels of 25x7x2 cm sizes were arranged to create continuous surface

Materials used for the formwork

Generally, the material to be used as a surface membrane for any curved surface has to fulfill two important requirements: Rigidity and flexibility for smooth surface curvature. The rigidity of the formwork surface membrane is governed by the minimum space between consecutive vertical supports pins (Fig. 5).

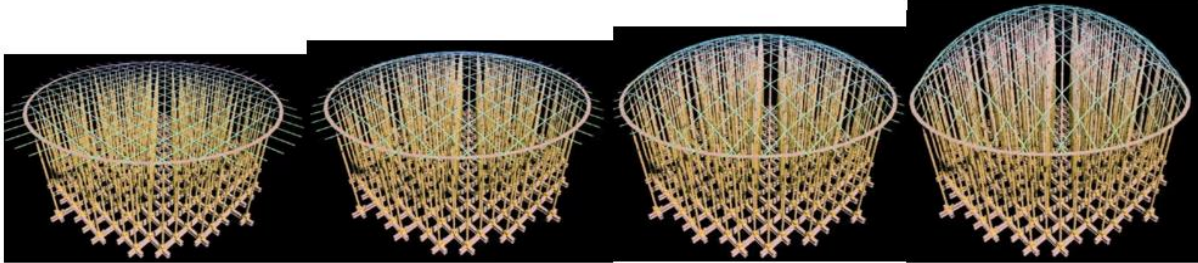


Fig. 5. 3D Simulation of adjustable support pins and flexible plate strips

Membrane Strength Compatibility

Referring to the European strength class systems of timber structure, the bending strength ranges 14 MPa -50 MPa or C14–C50 for soft woods [29]. And considering the effects of knots and other defects that reduce strength of timber, this paper takes low strength up 8 MPa for ultimate safety. And to analyze the timber panel carrying capacity to support a specified concrete thickness, the following empirical analysis is conducted.

Timber panel dimensions: $l = 250\text{mm}$ width, $b = 70\text{mm}$, thickness $t = 20\text{mm}$.

Timber bending strength, $f_b = 9.8\text{ MPa}$ shear strength, $f_v = 1.0\text{ MPa}$.

Moment resisting capacity of timber, M_{res} is given by:

$$M_{res} = \frac{\phi f_b * I}{y} = \frac{0.9 * 9.8 * \frac{bt^3}{12}}{\left(\frac{t}{2}\right)} = 41,160\text{ N} - \text{mm}. \quad (1)$$

For simply supported panel, bending moment maximum is given by:

$$M_{max} = \frac{w * l^2}{8} = \frac{w * (250)^2}{8} = 7812.5\text{ w mm}^2, \quad (2)$$

where w = linear loading of concrete supported by the timber panel.

Equating equations (1) and (2), max value of w is found to be, $w \leq 5.27\text{ N/mm}$.

With the given length and width of the panel, the maximum than taking specific density of concrete, $\gamma_c = 24000\text{ N/m}^3$, the maximum height of concrete that can safely supported by the timber panel is computed as:

$$h_{con} = \frac{w}{\gamma * b * l} = \frac{5.27\text{ N/mm}}{2.4 * 10^{-4}\text{ N/mm}^3 * 7\text{mm}} = 3137\text{ mm}.$$

The computation above demonstrates that a timber panel of 25 cm long can support up to 3.13 m thick concrete. And this justifies that prototype panel 25x7x2 cm used is structurally safe to support wet concrete up to 20 cm thick shells.

The panels were arranged side by side with a space of 1mm and nailed to fixed to three parallel rubber ropes. The plasticity of the rubber provides the desired flexibility of the membrane to fit various curvatures as shown in Fig. 6.

And to meet the requirement of smooth curvature, the size of the panel is main parameter. The shorter the spans and widths of the panel produces the smoother the curvature. However, it is crystal clear that the length of the panels determines the space between the pin supports. This means shorts lengths lead to closer supports, which increases the number of the supports and thereby the overall cost of the formwork.



Fig. 6. Formwork supports and membrane laying

As discussed in section 1, the formwork mould prepared by Van Roosbroeck [27], had pin bed spacing 3-5 cm which demands large number of support pins. Accordingly, a mould of 2x2m, for instance, would on average require about 2500 pin supports. And to minimize the number of the supports and to keep a relative smoother surface, this study randomly selected 25 cm long and 7cm wide timber panels. And the 2 m diameter dome is supported by less than 64 supports made from timber sized 5x5 cm which are erected from a ground surface. A steel plate of 30mm wide was laid over successive supports to provide support to the timber panels and lateral ties as well as shown in Fig. 7.



Fig. 7. Formwork membranes in position

Results and Discussion

The construction of the formwork for the intended curved surface was successfully erected and fitted model shape. As it can be noted from Fig. 8, the smoothness of the surface showed some irregularities and gaps at the joints between successive panel strips.



Fig. 8. Final Dome model

And to create a smoother finish, a thin layer of wet gypsum coat was applied which provided a smooth surface finish. Finally, the concrete paste was applied, which was cured for 28 days. And after the curing was over the formwork surface membrane was recovered without for further use. Despite the fact that the model was tested for the dome shape, the membrane arrangement is found to be applicable to be curved in any direction. The feasibility of fitting in to both the sagging (concave) and hogging (convex) shapes is demonstrated to be practical. Moreover, significant carpentry works were required to make cuttings and fitting modifications of the panel shapes at the ends of the panel strips with smaller arc lengths. This can be described to be the main challenges with the arrangement at the end edges.

Conclusion and recommendation

The arrangement of the timber panel was found to be flexible to fit any curves (of positive, zero and negative curvatures). And the optimum dimensions of the prototype panel determined the smoothness of the surface membrane. The panels retrieved after the curing are retrieved to reusable for farther use. The arrangement of the timber panels with a rubber lining to be flexible to various curves demonstrated the feasibility of using such reusable formwork membranes. And this can save the formwork cost from use and throw. The difficulty of fitting at the end edges created from the rigidity of the timber panel needs further refinement with adjustable panel designs. For the future, the paper recommends further study to be made to automate the vertical support pins with a computer-controlled stepper motor driver. Moreover, studying the cost and economic impacts of the reusable formwork with adjustable vertical supports are the future focus of study.

Благодарность / Acknowledgement

Статья подготовлена при поддержке программы стратегического академического лидерства РУДН.

This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Х.Й. Дамир – теоретические и конструктивные аспекты систем опалубки, а также изучение передовых материалов и технологий для изготовления бетонных оболочечных конструкций; М.И. Рынкoвская – анализ материалов для статьи, результатов; И.А. Сeрeкe – тематические исследования и реальные примеры, иллюстрирующие лучшие практики в области опалубки бетонных оболочек.

H.Yo. Damir – theoretical and design aspects of formwork systems, as well as the study of advanced materials and technologies for the manufacture of concrete shell structures; M.I. Rynkovskaya – analysis of materials for the article, results; I.A. Sereke – case studies and real examples illustrating best practices in the field of concrete shell formwork.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Eisenbach P., Grohmann M. Structural implementation of slender concrete shells with prefabricated elements // J. IASS. 2017. № 58. P. 51–64. DOI: <https://doi.org/10.20898/j.iass.2017.191.842>
2. Ermakova E., Rynkovskaya M. The use of shells in the architecture of the concert halls. Curved and layer // Struct. 2021. № 8. P. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.1515/cls-2021-0006>
3. Tang G. An overview of historical and contemporary concrete shells, their construction and factors in their general disappearance // International Journal of Space Structures. 2015. Vol. 30, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1260/0266-3511.30.1.1>
4. Huijben F.F., Herwijnen F. Frans., Nijse R. Concrete shell structures revisited : introducing a new and 'low-tech' construction method using vacuumatics formwork // International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures STRUCTURAL MEMBRANES 2011 5th International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures (Structural Membranes), 2011, October 5–7. Barcelona, Spain, 2011. P. 12.
5. Cassinello P., Schlaich M., Torroja J., Candela F. In memoriam (1910–1997). From thin concrete shells to the 21st century's lightweight structures // Informes De La Construcccion. 2010. Vol. 62, № 519. P. 5–19.
6. Rynkovskaya M. Analytical methods of analysis of right and open helicoids // American Society for Engineering Education Northeast Section Conference At: University of Bridgeport, 2009. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-79005-3_11
7. Raun C., Kristensen M.K., Kirkegaard P.H. Flexible mould for precast concrete elements: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). Symposium 2010, Shanghai Spatial Structures – Permanent and Temporary, November 8–12. Shanghai, China, 2010.

8. Muttoni A., Lurati F., Ruiz M. F. Concrete shells – towards efficient structures: construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland // *Structural Concrete*. 2013. № 14. P. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201200058>
9. Хафизов Т.М., Байбурин А.Х. Сравнительный анализ способа опускающегося бетона и метода скользящей опалубки. SAFETY. Екатеринбург, НИЦ «НИР БСМ» Уральского отделения РАН; Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, 2018. С. 1–7.
10. Bishop C., Trono W., Griffith M. Stability considerations for concrete forming support systems: Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council. Baltimore, Maryland, 2018.
11. Schleicher S., Herrmann M. Constructing hybrid gridshells using bending-active formwork // *Int. J. Sp. Struct.* 2020. № 35. P. 80–89.
12. Мацкевич А.Ф. Несъемная опалубка монолитных железобетонных конструкций. Москва: Стройиздат, 1986. 96 с.
13. Shen L.Y., Tam W.Y., Tam, C.M., Sam H. Material wastage in construction activities – a hong kong survey. Retrieved on 12.12.2022, 2002. URL: <https://www.researchgate.net/publication/37812483>
14. Li W., Lin X., Bao D.W., Xie Y.M. A review of formwork systems for modern concrete construction // Presented at Structures; Elsevier: Amsterdam. The Netherlands, 2022. № 38. P. 52–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.089>
15. Tang G. The Rise and fall of the thin concrete shell // Second International Conference on Flexible Formwork. Bath. UK: University of Bath, BRE CICM, 2012. P. 334–344.
16. Kromoser B., Kollegger J. Production of shell structures made of concrete with the "Pneumatic Wedge Method" – A new construction method for the construction of double-curved concrete surfaces // *Beton – und Stahlbetonbau*. 2014. Vol. 109, № 8. P. 557–565. <https://doi.org/10.1002/best.201400014>
17. Яшина Т.В., Алексеева А.А. Опалубочные работы при возведении монолитных бетонных и железобетонных конструкций: учеб.-метод. пособие; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. Гомель: БелГУТ, 2018. 96 с. ISBN 978-985-554-403-7 (ч. I)
18. Tang G., Pedreschi R.F. Deployable gridshells as formwork for concrete shells // *International Society of Flexible Formwork*. Amsterdam, The Netherlands, Aug 16–17, 2015. ISBN 978-90-5363-042-6
19. Kromoser B., Huber P. Pneumatic formwork systems in structural engineering / *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/4724036>
20. Raun C., Kristensen M.K., Kirkegaard P.H. Development and evaluation of mould for double curved concrete elements // *Structural Membranes: International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures – Structural Membranes: V International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures (MEMBRANES 2011)*, Barcelona, 5–7 October, 2011. ISBN 978-84-89925-58-8. URL: <https://hdl.handle.net/2117/186225>
21. Zhang X., Yuan C., Yang L., et al. Design and fabrication of formwork for shell structures based on 3D-printing technology // *Performance Based Design. eCAADe*. 2021. № 39. P. 487–495. DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.1.487>
22. Кривошапко С., Алборова Л., Мамиева И. Оболочечные структуры: генезис, материалы и подвиды. Часть 2. Конструкционные строительные материалы // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 4. С. 110–119. DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-4-110-119>
23. Khosravani M. R., Haghighi A. Large-scale automated additive construction: overview, robotic solutions, sustainability and future prospects // *Sustainability*. 2022. № 14. Art. 9782. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159782>
24. Jipa A., Dillenburg B. 3D printed formwork for concrete: state-of-the-art, opportunities, challenges and applications // *3D printing and additive manufacturing*. 2022. Vol. 9, № 2. P. 87–105. DOI: <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0024>
25. Кривошапко С., Алборова Л., Мамиева И. Оболочечные структуры: генезис, материалы и подвиды: Часть 1. Подвиды и направления // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 3. С. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-3-125-134>
26. Hartog E. D. Prefabrication of concrete shells: Master's Thesis; TUDelft; 2008. Retrieved on Jan 10, 2023. URL: <https://resolver.tudelft.nl/uuid:c3a6fa8d-c613-4dd6-bcb9-960c83410254>
27. Roosbroeck V.M. The Construction of prefab concrete shells, morphology-segmentation-material-production method: Master's Thesis; TUDelft, 2006.

28. Schipper R., Vambersky J. Flexibles Schalungs system für zweifach gebogene Betonfertigteile. Bauverlag BV GmbH, 2010. ISSN 0373-4331
29. Harte A. Introduction to timber as an engineering material. ICE manual for construction materials. retrieved on Oct 10, 2023, 2009.

REFERENCES

1. Eisenbach P., Grohmann M. Structural implementation of slender concrete shells with prefabricated elements. *J. IASS*, 2017, no. 58, pp. 51–64. DOI: <https://doi.org/10.20898/j.iass.2017.191.842>
2. Ermakova E., Rynkovskaya M. The use of shells in the architecture of the concert halls. Curved and layer. *Struct*, 2021, no. 8, pp. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.1515/cls-2021-0006>
3. Tang G. An overview of historical and contemporary concrete shells, their construction and factors in their general disappearance. *International Journal of Space Structures*, 2015, vol. 30, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1260/0266-3511.30.1.1>
4. Huijben F. F., Herwijnen F. Frans., Nijse R. Concrete shell structures revisited : introducing a new and 'low-tech' construction method using vacuumatics formwork. *International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures STRUCTURAL MEMBRANES 2011 5th International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures (Structural Membranes)*, 2011, October 5–7. Barcelona, Spain, 2011, pp. 12.
5. Cassinello P., Schlaich M., Torroja J., Candela F. In memoriam (1910–1997). From thin concrete shells to the 21st century's lightweight structures. *Informes De La Construcción*, 2010, vol. 62, no. 519, pp. 5–19.
6. Rynkovskaya M. Analytical methods of analysis of right and open helicoids. *American Society for Engineering Education Northeast Section Conference At: University of Bridgeport*, 2009. DOI: 10.1007/978-3-319-79005-3_11
7. Raun C., Kristensen M.K., Kirkegaard P.H. Flexible mould for precast concrete elements. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). Symposium 2010, Shanghai Spatial Structures – Permanent and Temporary November 8–12. Shanghai, China, 2010.*
8. Muttoni A., Lurati F., Ruiz M. F. Concrete shells – towards efficient structures: construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland. *Structural Concrete*, 2013, no. 14, pp. 43–50.
9. Khafizov T., Baiburin A. Comparative analysis of sinking concrete method and sliding formwork method. SAFETY. Ekaterinburg, SIC “NIR BSM” Ural Branch of RAS; Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2018. (In Russ.).
10. Bishop C., Trono W., Griffith M. Stability considerations for concrete forming support systems. *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council*. Baltimore, Maryland, 2018.
11. Schleicher S., Herrmann M. Constructing hybrid gridshells using bending-active formwork. *Int. J. Sp. Struct*, 2020, no. 35, pp. 80–89.
12. Matskevich A. F. Non-removable formwork of monolithic structures. Moscow: Stroyizdat, 1986. 96 p. (In Russ.).
13. Shen L.Y., Tam W.Y., Tam C.M., Sam H. Material wastage in construction activities – a hong kong survey. Retrieved on 12.12.2022. URL: <https://www.researchgate.net/publication/37812483>
14. Li W., Lin X., Bao D. W., Xie Y. M. A review of formwork systems for modern concrete construction. *Presented at Structures; Elsevier: Amsterdam. The Netherlands*, 2022, no. 38, pp. 52–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.089>
15. Tang G. The Rise and fall of the thin concrete shell. *Second International Conference on Flexible Formwork*. Bath. UK: University of Bath, BRE CICM, 2012. P. 334–344.
16. Kromoser B., Kollegger J. Production of shell structures made of concrete with the "Pneumatic Wedge Method" – A new construction method for the construction of double-curved concrete surfaces. *Beton – und Stahlbetonbau*, 2014, vol. 109, no. 8, pp. 557–565. DOI: <https://doi.org/10.1002/best.201400014>
17. Yashina T., Alekseeva A. Formwork works in erection of monolithic concrete and reinforced concrete structures. Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, Belarus State University of Transport. Gomel: BelSUT, 2018. 96 p. ISBN 978-985-554-403-7 (part I). (In Russ.).
18. Tang G., Pedreschi R.F. Deployable gridshells as formwork for concrete shells. *International Society of Flexible Formwork*. Amsterdam, The Netherlands, Aug 16–17, 2015. ISBN 978-90-5363-042-6
19. Kromoser B., Huber P. Pneumatic formwork systems in structural engineering. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/4724036>

20. Raun C., Kristensen M.K., Kirkegaard P.H. Development and evaluation of mould for double curved concrete elements. *Structural Membranes: International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures - Structural Membranes: V International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures (MEMBRANES 2011)*, Barcelona, 5–7 October, 2011. ISBN 978-84-89925-58-8. URL: <https://hdl.handle.net/2117/186225>
21. Zhang X., Yuan C., Yang L., et al. Design and fabrication of formwork for shell structures based on 3D-printing Technology. *Performance based design. eCAADe*, 2021, no. 39, pp. 487–495. DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.1.487>
22. Krivoschapko S., Alborova A., Mamieva A. Shell structures: genesis, materials and subspecies. Part 2. Structural building materials. *Scientific Journal "Academia Architecture and Construction"*, 2021, no. 4, pp. 110–119. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-4-110-119>
23. Khosravani M.R., Haghighi A. Large-scale automated additive construction: overview, robotic solutions, sustainability and future prospects. *Sustainability*, 2022, no. 14, art. 9782. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159782>
24. Jipa A., Dillenburg B. 3D printed formwork for concrete: state-of-the-art, opportunities, challenges and applications. *3D printing and additive manufacturing*, 2022, vol. 9, no. 2, pp. 87–105. DOI: <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0024>
25. Krivoschapko S.N., Alborova L.A., Mamieva I.A. Shell structures: genesis, materials and subspecies. Part 1: Subspecies and directions. *Architecture and Construction*, 2021, no. 3, pp. 125–134. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-3-125-134>
26. Hartog E.D. Prefabrication of concrete shells. Master's Thesis; TUDelft; 2008. Retrieved on Jan 10, 2023. URL: <https://resolver.tudelft.nl/uuid:c3a6fa8d-c613-4dd6-bcb9-960c83410254>
27. Roosbroeck V.M. The Construction of prefab concrete shells, morphology-segmentation-material-production method. Master's Thesis; TUDelft, 2006.
28. Schipper R., Vambersky J. Flexibles Schalungs system für zweifach gebogene Betonfertigteile. Bauverlag BV GmbH, 2010. ISSN 0373-4331
29. Harte A. Introduction to timber as an engineering material. ICE manual for construction materials. retrieved on Oct 10, 2023, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дамир Хабте Йоханнес – кандидат технических наук, лектор, Российский университет дружбы народов (Москва, Российская Федерация),

✉ khabtej@oiate.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7275-6750>

Habte Yo. Damir, Candidate of Technical Sciences, Lecturer, Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russian Federation).

Рынкoвская Марина Игоревна – доктор строительной механики, доцент, Российский университет дружбы народов (Москва, Российская Федерация),

✉ rynkovskaya-mi@rudn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2206-2563>

Marina I. Rynkovskaya, Doctor of Civil Engineering, Associate Professor, Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russian Federation).

Серее Иссайас Андай – кандидат технических наук, лектор, Российский университет дружбы народов (Москва, Российская Федерация),

✉ 1042195035@pfur.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4351-8205>

Issaias A. Sereke, Candidate of Technical Sciences, Lecturer, Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 01.03.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 04.04.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

Обзорная статья

УДК 691.714

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/94-104>

Конструкции с применением сотовых структур

Иван Леонидович Шипелев[✉], Николай Леонидович Тишков

Тихоокеанский государственный университет,

Хабаровск, Российская Федерация

✉ iva-shipelev@mail.ru

Аннотация. Инновационные сотовые конструкции привлекли значительное внимание исследователей в последние годы благодаря своим уникальным механическим характеристикам и особым свойствам. В статье приведены ключевые зарубежные публикации, содержащие яркие примеры исследований в области сотовых структур, представлен достаточно широкий обзор достижений в разработке инновационных сотовых конструкций за последние двадцать лет, охватывая темы заполнения, интегрирования, конструкций с отрицательным коэффициентом Пуассона и др. Рассмотрены основные механические свойства этих конструкций, выявлены их сильные и слабые стороны, обусловленные особенностями их геометрии, механическими параметрами и динамическими откликами. Анализ литературных источников позволил выделить актуальные проблемы и обозначить возможные направления будущих исследований. Выводы обзора предлагают ценные рекомендации для дальнейшего изучения и проектирования лёгких, прочных пролётных конструкций с использованием сотовых структур. Чтобы углубить понимание особенностей поведения сотовых конструкций, необходимы дополнительные исследования аналогичных элементов и полноценных образцов конструкций.

Ключевые слова: сотовые структуры, соты, сотовые конструкции, строительные конструкции, композитные панели, прочность, устойчивость

Для цитирования: Шипелев И.Л., Тишков Н.Л. Конструкции с применением сотовых структур // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 94–104.

Review article

Structures using honeycomb structures

Ivan L. Shipelev[✉], Nikolay L. Tishkov

Pacific National University,

Khabarovsk, Russian Federation

✉ iva-shipelev@mail.ru

Abstract. Innovative honeycomb structures have attracted significant attention from researchers in recent years due to their unique mechanical properties and special characteristics. The article presents key foreign publications containing striking examples of research in the field of honeycomb structures, and provides a fairly broad overview of achievements in the development of innovative honeycomb structures over the past twenty years, covering the topics of filling, integration, structures with a negative Poisson ratio, etc. It examines the main mechanical properties of these structures, identifies their strengths and weaknesses based on geometry, mechanical parameters, and dynamic responses. Analysis of literature sources has highlighted current challenges and outlined potential directions for future research. The conclusions offer valuable recommendations for further investigation and design of lightweight, robust span structures using cellular configurations. To deepen understanding of the behavior of cellular structures, additional studies are needed on analogous elements and full-scale structural samples.

Keywords: honeycomb structures, honeycombs, cellular structures, building structures, composite panels, strength, stability

For citation: Shipelev I.L., Tishkov N.L. Structures using honeycomb structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 94–104. (In Russ.).

Введение

Задачей научно-технического прогресса в области строительства является эффективное распределение материалов в несущих конструкциях, обеспечивающее высокий процент использования материалов по прочности и снижение итоговой массы конструкций. Создание пролётных конструкций, обладающих высокой прочностью, жёсткостью и способных противостоять различным воздействиям, представляет собой сложную задачу. Для выполнения ряда противоречивых требований возникла идея использовать составные конструкции, где каждый элемент отвечает за выполнение одной или нескольких функций. Одним из видов таких конструкций являются конструкции с применением сотовых структур (КсПСС). Эти конструкции обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными видами. Лёгкость: эффективность по массе сотовых конструкций возрастает с увеличением удельной жёсткости несущих слоёв [1]. Высокий коэффициент внутреннего поглощения энергии: затухание колебаний на один-два порядка выше, чем у классических конструкций. Выносливость: предел выносливости увеличивается при снижении жёсткости заполнителя на сдвиг [2]. Помимо вышеперечисленных достоинств, следует отметить также повышенные теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства.

Сферы применения сотовых структур

Сотовые структуры нашли применение во множестве отраслей промышленности благодаря своим уникальным свойствам и преимуществам.

Авиация и аэрокосмическая промышленность. Сотовые структуры используются в конструкциях самолётов и космических аппаратов для снижения веса и повышения прочности. Такие структуры отличаются от клёпанных более высокой удельной прочностью и меньшим количеством деталей, обладают улучшенными аэродинамическими качествами и менее трудоёмки в изготовлении [3].

Строительство. Использование сотовых структур в строительных элементах, таких как сотовые панели для стен и крыш, которые обеспечивают сравнительную лёгкость и теплоизоляцию строительных конструкций.

Автомобильная, железнодорожная и судостроительная промышленность. Применение сотовых материалов в кузовах автомобилей, вагонов и судах для улучшения безопасности и уменьшения веса. Некоторые элементы машин и судов заменяются слоистыми конструкциями, представляющими собой две листовые обшивки с внутренним заполнителем, придающим конструкции устойчивость при нагружении [4].

Энергетика. Сотовые структуры используются в ветряных турбинах и солнечных панелях для повышения эффективности и прочности.

Упаковка. Сотовые структуры в упаковочных материалах обеспечивают защиту товаров и лёгкость.

Медицинская техника. Используются в различных устройствах и имплантатах для обеспечения лёгкости и биосовместимости.

Спортивное оборудование. Применение сотовых структур в спортивном инвентаре для улучшения характеристик и снижения веса.

Если говорить о нематериальном применении сотовых структур, то следует упомянуть и *телекоммуникации*. Применение сотовых структур в мобильной связи, где они обеспечивают эффективное покрытие и распределение сигналов.

Приведённые примеры показывают, как сотовые структуры помогают улучшать характеристики продуктов и процессов в различных отраслях.

Предпосылки к созданию сотовых структур

Учёные обнаружили, что шестиугольная структура, сравнимая с пчелиными сотами, превосходно ведёт себя при относительно малом весе и при этом демонстрирует хороший механический потенциал [5]. Первая искусственная сотовая структура была сделана из бумаги в Китае несколько тысяч лет назад. А в 1945 году была изготовлена первая полностью алюминиевая сэндвич-панель. С тех пор виды сотовых структур изготавливались из множества различных материалов, таких как алюминиевый сплав [6], нержавеющая сталь [7], титан [8] и неметаллические материалы (стекловолокно [9], Nomex [10], крафт-бумага [11]).

За последние десятилетия было предложено много креативных сотовых структур, таких как Nomex (рис.1), панельные конструкции из сот (рис. 2).



Рис. 1. Сотовые структуры Nomex, испытание сот на растяжение [10]

Fig. 1. Nomex honeycomb structures, honeycomb tensile testing [10]

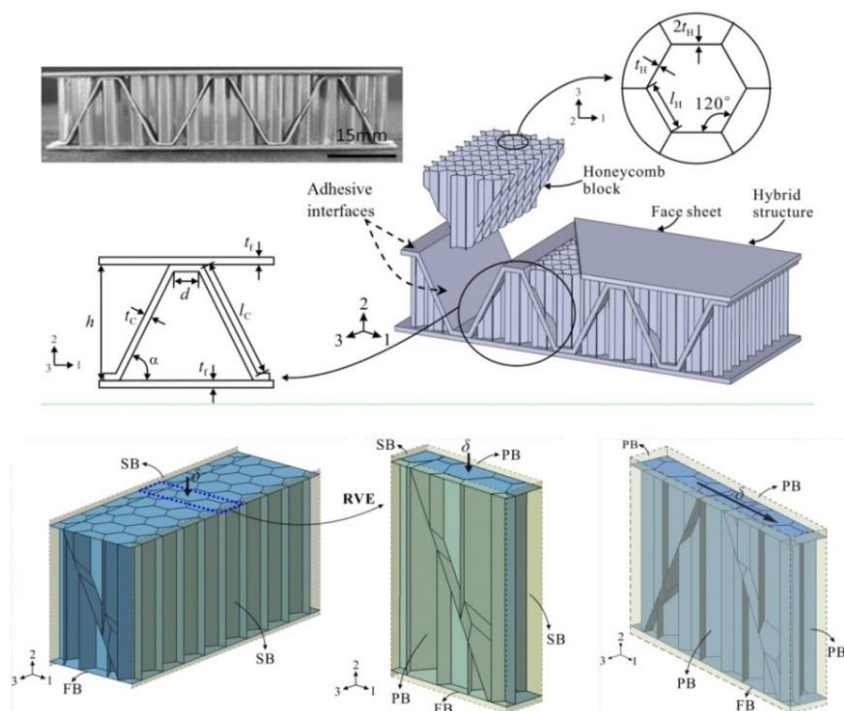


Рис. 2. Панельные конструкции из сот

Fig. 2. Honeycomb panel structures

Виды исследований сотовых структур

За последние два десятилетия исследования сотовых структур проводились следующие виды испытаний: осевое сжатие [12], выпучивание [13, 14], усталостное разрушение [15], определение тепловых и акустических характеристик [16, 17]. Имеются многочисленные специализированные исследования, направленные на изучение механических характеристик сотовых структур [18], испытываемых разнообразными видами нагрузок. Изучалось поведение сот под воздействием нагрузок, действующих в плоскости наибольшей жёсткости [19, 20], из плоскости наибольшей жёсткости [21]. Отдельные работы посвящены изучению реакций сотовых структур на низкоскоростные [22] и высокоскоростные ударные воздействия [23]. Кроме того, проводились исследования по поведению сот под действием изгибающих [24, 25] и сдвиговых [26, 27] усилий. Также рассматриваются вопросы, связанные с расположением сот под определённым углом к вертикальной оси [28]. Эти исследования показали, что нагрузка на наклонные соты существенно влияет на характер деформации.

Экспериментальные данные подчёркивают, что сотовые структуры отличаются хорошими показателями энергоёмкости [29, 30]. Однако способность единичной сотовой ячейки поглощать энергию недостаточна для большинства приложений. Чтобы достичь требуемого уровня эффективности, необходим тщательный подбор оптимальной формы и размеров ячеек. Рациональные параметры, определяемые в ходе исследований инновационных структур, оказывают существенное влияние на связь между элементами сот и общую несущую способность конструкции, а также определяют места потенциальных повреждений.

Методы исследования

Типичными методами исследования работы является экспериментальный анализ, который общепризнано является наиболее надёжным способом.

С развитием технологий компьютерного моделирования численные методы анализа получили широкое распространение и применяются практически во всех сферах инженерии. Важное преимущество численного анализа состоит в том, что проведение натурных экспериментов зачастую ограничено различными факторами, такими как высокая стоимость, временные ограничения и сложность воспроизведения необходимых условий. Поэтому большинство современных инженерных расчётов выполняются с применением специализированных программных комплексов, таких как **ANSYS** (США) и **ABAQUS** (США).

Отечественными учёными расчёты и анализ поведения сотовых структур проводятся преимущественно с использованием программного комплекса **ANSYS** и пакета **ЛИРА САПР** (Украина). Оба инструмента зарекомендовали себя как надёжные средства благодаря своим мощным инструментам для параметрического анализа, позволяя инженерам быстро тестировать большое количество вариантов конструкций и оценивать их характеристики.

Расчётные модели сотовых структур могут разрабатываться как полноразмерные [31] (например, целая панель), так и локально детализованные (отдельные фрагменты или секции). Такой подход помогает уменьшить вычислительную нагрузку и повышает точность полученных результатов.

При численном моделировании сотовых структур, по результатам расчётов, предлагалось увеличение геометрии ячеек [32]. Основная идея заключается в том, что сотовые структуры с одинаковым соотношением толщины стенки к длине стенки должны проявлять схожее механическое поведение и распределение усилий.

Наиболее распространённой теоретической моделью элементов сот, предложенной Вежбицким [33], является теоретическая основа для анализа способности структур выступать в роли эффективных поглотителей энергии от внешних воздействий. Эта модель наглядно демонстрирует процесс распределения напряжений внутри сот при их сжатии.

Метод эквивалентной однородности широко применялся для изучения сотовых структур [34, 35]. Этот метод позволял упростить анализ механических характеристик сот, особенно для определения их упругих свойств [36] и жёсткости на сдвиг [37], заменяя полную масштабную модель упрощёнными приближениями.

Какой бы метод ни использовался, все они прошли проверку временем и доказали свою обоснованность и достоверность как в научных исследованиях, так и в практических инженерных приложениях.

Виды сотовых структур

Сотовые конструкции с заполнением занимают лидирующие позиции среди композитных структур благодаря своим преимуществам: простоты конфигурации и несложности в производстве. Идея заполнения впервые была применена к пенопластовым структурам. Для нахождения оптимальной комбинации были исследованы различные наполнители и вставки по образцу контейнеров (рис. 3). В качестве наполнителей использовались различные металлические квадратные трубы, включая рифлёные трубы [38], многоячеистые трубы [39] и армированные конусные трубы [40].



Рис. 3. Сотовые структуры со вставками-трубками

Fig. 3. Honeycomb structures with tube inserts

Рассматривались и другие схемы заполнения – полиуретановые, стеклянные, полиэфирные с закрытыми ячейками, множество тонкостенных, со встроенными алюминиевыми цилиндрическими трубками, решётчатые композитные панели, заполненные пеной. Исходя из вышеупомянутых исследований, можно заключить, что заполненные структуры являются эффективным и надёжным способом рассеивания значительных напряжений при осевом сжатии. Существует ряд исследований, посвящённых экспериментальным и численным испытаниям тонких квадратных труб, заполненных сотовыми элементами. Полученные результаты демонстрируют, что подобные структуры обладают лучшими механическими свойствами, обеспечивающими эффективное поглощение энергии и повышение несущей способности.

Авторами работы [41] была предложена новая конструкция – двойная функционально-градиентная структура, включающая градиентный сотовый наполнитель с переменной толщиной стенок. Анализ поведения данной конфигурации в условиях динамического нагружения показал, что с ростом величины смещения при разрушении такая структура обладает наиболее высокой способностью к поглощению энергии по сравнению с традиционными аналогами. Данная закономерность сохраняется независимо от углов приложения нагрузки.

Использование сотовых структур в качестве наполнителей способствует значительному увеличению энергопоглощающих способностей и несущей способности конструктивных элементов. При воздействии осевых нагрузок наблюдается заметное улучшение устойчивости металлических оболочек благодаря наличию сотового заполнения.

Вместе с тем необходимо учитывать зависимость между формой контейнера и типом наполняющего материала. Различия в физических и механических свойствах компонентов мо-

гут приводить к различным реакциям конструкции на внешние воздействия, зависящим главным образом от назначения самой сотовой структуры.

Некоторые авторы отмечают, что правильное позиционирование и выбор расположения сот оказывает значительное влияние на деформативность [42]. Ошибочное размещение сот может вызвать образование дефектов и негативно сказаться на стабильности системы при сжимающей нагрузке.

Отдельно следует упомянуть и сотовые структуры с отрицательным коэффициентом Пуассона. Соты обеспечиваются отрицательным коэффициентом Пуассона за счёт специально разработанной ячеистой геометрии (рис. 4). Представлена наиболее изученная конфигурация сотовых структур — шестигранные соты [43]. В данном типе сот, благодаря направленному внутрь прогибу стенок каждой ячейки, соты расширяются под действием растягивающей нагрузки, в то время как сжимаются под действием сжимающей нагрузки.

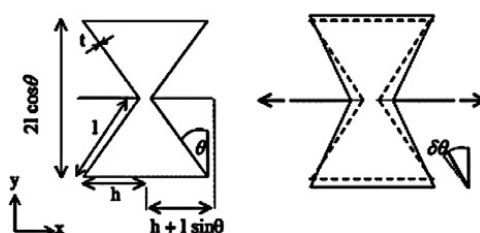


Рис. 4. Фрагмент ячейки сот с отрицательным коэффициентом Пуассона

Fig. 4. Fragment of honeycomb cell with negative Poisson's ratio

Основой функционирования конструкций из сот служит реакция отдельных ячеек. Благодаря взаимосвязанной сетке распорок между элементарными ячейками, возникает частично ауксетическое поведение, которое проявляется на уровне всей глобальной структуры.

Теоретический анализ предложил новый подход к рассмотрению элементарной ячейки с учётом специфичных конфигураций. Это позволило описать поведение всей сотовой конструкции через исследование одной типичной ячейки, предоставляя возможность эффективного повторного моделирования.

Ряд новых конфигураций, направленных на увеличение прочности плоскостных сот с отрицательным коэффициентом Пуассона, описан в работе [44]. Было показано, что одним из эффективных методов усиления является введение дополнительного элемента (полосы) внутрь первоначальных сот. Такие модификации позволили добиться повышенной способности к поглощению энергии и ударостойкости. Это делает соты перспективными материалами для защиты оборудования от взрыва, применения в трансформируемых самолётах, железнодорожных вагонах и других областях.

Стоит подчеркнуть, что технология изготовления крупногабаритных сотовых структур с отрицательным коэффициентом Пуассона пока находится на начальной стадии своего развития.

Заключение

Все упомянутые работы проливают свет на адаптацию КсПСС для инженерного применения и демонстрируют потенциальную ценность структурного усовершенствования конструкции с желаемыми свойствами и функциями.

Хотя исследования традиционных и инновационных сотовых структур привели к значительным успехам в области разработки новых материалов и конфигураций, они всё ещё сталкиваются с рядом ограничений. Среди основных проблем выделяются сложности в производстве, низкая функциональность и другие аспекты, препятствующие массовому внедрению и применению данных разработок.

Для ранее упомянутых инновационных сот, особенно для сотовых структур с наполнениями и контейнерами, необходимы дальнейшие исследования напряжённо деформированного состояния по критериям смещения, жёсткости и прочности.

Хотя представленные инновационные сотовые структуры имеют уникальные преимущества, они остаются скорее идеализированными моделями, разработанными исследователями в лабораторных условиях.

Следует отметить, что, несмотря на очевидные преимущества сотовых структур (повышенные показатели устойчивости, жёсткости, способности поглощать энергию, сопротивление взрывному воздействию, теплоизолирующие и звукозащитные качества), сфера их практического применения остаётся ограниченной из-за высоких производственных издержек и технологической сложности. Тем не менее, учитывая указанные достоинства, включение таких структур в строительные конструкции становится целесообразным решением.

Представленные исследования показывают, что сотовые материалы проявляют высокие эксплуатационные характеристики по таким параметрам, как распределение напряжений и повышенная прочность при осевом сжатии. Следовательно, интеграция таких структур в пролётные конструкции зданий и сооружений способна обеспечить существенными преимуществами

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

И.Л. Шипелев – обзор иностранных статей, краткие описания основных исследований, выводы по результатам исследований, постановка задачи будущих исследований, ответственность за целостность всех частей статьи; Н.Л. Тишков – общее руководство, обобщение результатов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

I.L. Shipeliev – review of foreign articles, brief description of the main studies, conclusions based on the results of the studies, setting the task of future studies, responsibility for the integrity of all parts of the article; N.L. Tishkov – general management, generalization of the results. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Руденко М.С., Михеев А.Е., Гирн А.В. Технология изготовления сотовых заполнителей из полимерных композиционных материалов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 391–397. DOI: <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2021-22-2-391-397>
2. Иванов А.А., Гофин М.Я. Механика сотовых заполнителей. Т. 1. Московский лесотехнический институт, 1989. 315 с.
3. Берсудский В.Е., Крысин В.Н., Лесных С.И. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
4. Благов В.А., Калмачков А.Н., Кобелев В.Н., Прохоров Б.Ф. Лёгкие судовые конструкции из пластмасс. Л.: Судостроение, 1969. 264 с.
5. Першин. А.М. Расчётное исследование статической устойчивости сотовых заполнителей из композиционных материалов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. № 5(47). Часть 1. С. 118–123.
6. Yang X., Sun Y., Yang J., Pan Q. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructured // Thin-Walled Struct. 2018.
7. Hong S., Pan J., Tyan T., Prasad P. Quasi-static crush behavior of aluminum honeycomb specimens under compression dominant combined loads // Int. J. Plast. 2006. P. 73–109.
8. Dharmasena K.P., Wadley H.N.G., Xue Z., Hutchins J.W. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading // Int. J. Impact Eng. 2008. № 35. P. 1066–1075.
9. Shahdin A., Mezeix L., Bouvet C., Morlier J., Gourinat Y. Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: a comparison with honeycomb and foam sandwich beams // Composite Structures. 2009. P. 404–412.
10. Garam K., Ronald S., Waterloo T. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets // Composite Structures. 2018. № 206. P. 535–549.

11. Chen Z., Yan N. Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels // *Compos B Eng.* 2012. № 43. P. 2107–2114.
12. Wang Q., Li Z., Zhang Y., Cui S., Yang Z., Lu Z. Ultra-low density architected metamaterial with superior mechanical properties and energy absorption capability // *Compos. B Eng.* 2020. P. 202–215.
13. Okumura D., Ohno N., Noguchi H. Post-buckling analysis of elastic honeycombs subject to in-plane biaxial compression // *Int J Solids Struct.* 2002. № 39. P. 3487–3503.
14. Jang W.Y., Kyriakides S. On the buckling and crushing of expanded honeycomb // *Int J Mech Sci.* 2015. № 91. P. 81–90.
15. Abbadi A., Azari Z., Belouettar S., Gilgert G., Freres P. Modelling the fatigue behavior of composites honeycomb materials (aluminium/aramide fibre core) using four-point bending tests // *Int J Fatigue.* 2010. № 32. P. 1739–1747.
16. Yeh C.L., Chen Y.F., Wen C.Y., Li K.T. Measurement of thermal contact resistance of aluminum honeycombs // *Exp Therm Fluid Sci.* 2003. № 27. P. 27–281.
17. Ng C.F., Hui C.K. Low frequency sound insulation using stiffness control with honeycomb panels // *Appl Acoust.* 2008. № 69. P. 293–301.
18. Ruan D., Lu G., Wang B., Yu T. In-plane dynamic crushing of honeycombs – a finite element study // *Int J Impact Eng.* 2003. № 28. P. 161–182.
19. Cricri G., Perrella M., Calì C. Honeycomb failure processes under in-plane loading // *Compos Part B.* 2013. № 45. P. 1079–1090.
20. Hua L., You F., Yu T. Effect of cell-wall angle on the in-plane crushing behaviour of hexagonal honeycombs // *Mater Des.* 2013. № 46. P. 511–523.
21. Khan M.K., Baig T., Mirza S. Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb // *Mat Sci Eng A-Struct.* 2012. № 539. P. 135–142.
22. Besant T., Davies G.A.O., Hitchings D. Finite element modeling of low velocity impact of composite sandwich panels // *Compos Part A-Appl S.* 2001. № 32. P. 1189–1196.
23. Buitrago B.L., Santiuste C., Sánchez-Sáez S., Barbero E., Navarro C. Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact // *Composite Structures.* 2010. № 92. P. 2090–2096.
24. He L., Yuan-Sheng Ch., Liu J. Precise bending stress analysis of corrugatedcore, honeycomb-core and X-core sandwich panels // *Composite Structures.* 2012. № 94. P. 1656–1668.
25. Santosa S., Wierzbicki T. Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns // *Int J Mech Sci.* 1999. № 41. P. 995–1019.
26. Zhou Q., Mayer R.R. Characterization of aluminum honeycomb material failure in large deformation compression, shear, and tearing // *J Eng Mater-T Asme.* 2002. № 124. P. 412–420.
27. Pan S.D., Wu L.Z., Sun Y.G., Zhou Z., Qu J. Longitudinal shear strength and failure process of honeycomb cores // *Composite Structures.* 2006. № 72. P. 42–46.
28. Montazeri A., Saeedi A., Bahmanpour E. Enhancing the compressive properties of re-entrant honeycombs by line defects with insight from nature // *Materials Today Communications.* 2024. № 38. P. 700–713.
29. Lu G.X., Yu T.X. Energy absorption of structures and materials // Cambridge: Woodhead Publishing. 2001. Vol. 1. 402 p.
30. Yamashita M., Gotoh M. Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications–numerical simulation and experiment // *Int J Impact Eng.* 2005. № 32. P. 618–630.
31. Meran A.P., Toprak T., Muğan A. Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures // *Thin-Walled Struct.* 2014. № 78. P. 87–94.
32. Habib F.N., Iovenitti P., Masood S.H., Nikzad M. Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures // *Int J Adv Manuf Technol.* 2018. № 94. P. 2369–2380.
33. Wierzbicki T. Crushing analysis of metal honeycombs // *Int J Impact Eng.* 1983. № 1. P. 157–174.
34. Xu F., Qiao P. Homogenized elastic properties of honeycomb sandwich with skin effect // *Int J Solids Struct.* 2002. № 39. P. 2153–2188.
35. Catapano A., Montemurro M. A multi-scale approach for the optimum design of sandwich plates with honeycomb core. Part I: Homogenisation of core properties // *Composite Structures.* 2014. № 118. P. 677–690.
36. Li Y.M., Hoang M.P., Abbes B., Abbes F., Guo Y.Q. Analytical homogenization for stretch and bending of honeycomb sandwich plates with skin and height effects // *Composite Structures.* 2015. Vol. 120. P. 406–416.

37. Shi G., Tong P. Equivalent transverse shear stiffness of honeycomb cores // *Int J Solids Struct.* 1995. № 32. P. 1383–1393.
38. Niknejad A., Abedi M.M., Liaghat G.H., Nejad M.Z. Prediction of the mean folding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by theoretical analysis // *Mater Des.* 2012. № 37. P. 144–151.
39. Güden M., Kavi H. Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes // *Thin-Walled Struct.* 2006. № 44. P. 739–750.
40. Lin J.S., Wang X., Lu G. Crushing characteristics of fiber reinforced conical tubes with foam-filler // *Composite Structures.* 2014. № 116. P. 18–28.
41. Zhu G., Li S., Sun G., Li G., Li Q. On design of graded honeycomb filler and tubal wall thickness for multiple load cases // *Thin-Walled Struct.* 2016. № 109. P. 377–389.
42. Wang Chengjian, Wang Cheng, Li Z., He Y., Zhang Z., Zhang Y. Mechanical properties of novel 3D printing 316L stainless steel honeycomb structure reinforced aluminum matrix composites // *Intermetallics.* 2025. № 181. P. 743–753.
43. Prawoto Y. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: a structural review on the negative Poisson's ratio // *Comput Mater Sci.* 2012. № 58. P. 140–153.
44. Zied K., Osman M., Elmahdy T. Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores // *Phys Status Solidi B.* 2015. № 252. P. 2685–2692.

REFERENCES

1. Rudenko M.S., Miheev A.E., Girn A.V. Technology of manufacturing honeycomb fillers from polymer composite materials. *Siberian Aerospace Journal.* 2021, vol. 22, no 2, pp. 391–397. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2021-22-2-391-397>
2. Ivanov A.A., Gofin M.Ya. Mechanics of honeycomb cores. Moskovskij lesotekhnicheskij institut. 1989, vol. 1, 315 p. (In Russ.).
3. Bersudskij V.E., Krysin V.N., Lesnyh S.I. Manufacturing technology of cellular aircraft structures. M.: Mechanical Engineering, 1975. 296 p. (In Russ.).
4. Blagov V.A., Kalmachkov A.N., Kobelev V.N., Prohorov B.F. Lightweight ship structures made of plastics. L.: Shipbuilding, 1969, 264 p. (In Russ.).
5. Pershin A.M. Computational study of static stability of honeycomb cores made of composite materials. *Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2014, no. 5(47), pp. 118–123. (In Russ.).
6. Yang X., Sun Y., Yang J., Pan Q. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructured. *Thin-Walled Struct.*, 2018.
7. Hong S., Pan J., Tyan T., Prasad P. Quasi-static crush behavior of aluminum honeycomb specimens under compression dominant combined loads. *Int. J Plast.* 2006, pp. 73–109.
8. Dharmasena K.P., Wadley H.N.G., Xue Z., Hutchins J.W. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. *Int. J Impact Eng.*, 2008, no. 35, pp. 1066–1075.
9. Shahdin A., Mezeix L., Bouvet C., Morlier J., Gourinat Y. Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: a comparison with honeycomb and foam sandwich beams. *Composite Structures*, 2009, pp. 404–412.
10. Garam K., Ronald S., Waterloo T. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets. *Composite Structures*, 2018, no. 206, pp. 535–549.
11. Chen Z., Yan N. Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels. *Compos B Eng.*, 2012, no. 43, pp. 2107–2114.
12. Wang Q., Li Z., Zhang Y., Cui S., Yang Z., Lu Z. Ultra-low density architected metamaterial with superior mechanical properties and energy absorption capability. *Compos. B Eng.* 2020, pp. 202–215.
13. Okumura D., Ohno N., Noguchi H. Post-buckling analysis of elastic honeycombs subject to in-plane biaxial compression. *Int J Solids Struct.*, 2002, no. 39, pp. 3487–3503.
14. Jang W.Y., Kyriakides S. On the buckling and crushing of expanded honeycomb. *Int J Mech Sci.*, 2015, no. 91, pp. 81–90.
15. Abbadi A., Azari Z., Belouettar S., Gilgert G., Freres P. Modelling the fatigue behavior of composites honeycomb materials (aluminium/aramide fibre core) using four-point bending tests. *Int J Fatigue*, 2010, no. 32, pp. 1739–1747.

16. Yeh C.L., Chen Y.F., Wen C.Y., Li K.T. Measurement of thermal contact resistance of aluminum honeycombs. *Exp Therm Fluid Sci.*, 2003, no. 27, pp. 27–281.
17. Ng C.F., Hui C.K. Low frequency sound insulation using stiffness control with honeycomb panels. *Appl Acoust.*, 2008, no. 69, pp. 293–301.
18. Ruan D., Lu G., Wang B., Yu T. In-plane dynamic crushing of honeycombs – a finite element study. *Int J Impact Eng.*, 2003, no. 28, pp. 161–182.
19. Cricri G., Perrella M., Calì C. Honeycomb failure processes under in-plane loading. *Compos Part B.*, 2013, no. 45, pp. 1079–1090.
20. Hua L., You F., Yu T. Effect of cell-wall angle on the in-plane crushing behaviour of hexagonal honeycombs. *Mater Des.*, 2013, no. 46, pp. 511–523.
21. Khan M.K., Baig T., Mirza S. Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb. *Mat Sci Eng A-Struct.*, 2012, no. 539, pp. 135–142.
22. Besant T., Davies G.A.O., Hitchings D. Finite element modeling of low velocity impact of composite sandwich panels. *Compos Part A-Appl S.*, 2001, no. 32, pp. 1189–1196.
23. Buitrago B.L., Santiuste C., Sánchez-Sáez S., Barbero E., Navarro C. Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact. *Composite Structures*, 2010, no. 92, pp. 2090–2096.
24. He L., Yuan-Sheng Ch., Liu J. Precise bending stress analysis of corrugatedcore, honeycomb-core and X-core sandwich panels. *Composite Structures*, 2012, no. 94, pp. 1656–1668.
25. Santosa S., Wierzbicki T. Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns. *Int J Mech Sci.*, 1999, no. 41, pp. 995–1019.
26. Zhou Q., Mayer R.R. Characterization of aluminum honeycomb material failure in large deformation compression, shear, and tearing. *J Eng Mater-T Asme.* 2002, no. 124, pp. 412–420.
27. Pan S.D., Wu L.Z., Sun Y.G., Zhou Z., Qu J. Longitudinal shear strength and failure process of honeycomb cores. *Composite Structures*, 2006, no. 72, pp. 42–46.
28. Montazeri A., Saeedi A., Bahmanpour E. Enhancing the compressive properties of re-entrant honeycombs by line defects with insight from nature. *Materials Today Communications*, 2024, no. 38, pp. 700–713.
29. Lu G.X., Yu T.X. Energy absorption of structures and materials. Cambridge: Woodhead Publishing, 2001.
30. Yamashita M., Gotoh M. Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications—numerical simulation and experiment. *Int J Impact Eng.*, 2005, no. 32, pp. 618–630.
31. Meran A.P., Toprak T., Muğan A. Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures. *Thin-Walled Struct.*, 2014, no. 78, pp. 87–94.
32. Habib F.N., Iovenitti P., Masood S.H., Nikzad M. Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures. *Int J Adv Manuf Technol.*, 2018, no. 94, pp. 2369–2380.
33. Wierzbicki T. Crushing analysis of metal honeycombs. *Int J Impact Eng.*, 1983, no. 1, pp. 157–174.
34. Xu F., Qiao P. Homogenized elastic properties of honeycomb sandwich with skin effect. *Int J Solids Struct.*, 2002, no. 39, pp. 2153–2188.
35. Catapano A., Montemurro M. A multi-scale approach for the optimum design of sandwich plates with honeycomb core. Part I: homogenisation of core properties. *Composite Structures*, 2014, no. 118, pp. 677–690.
36. Li Y.M., Hoang M.P., Abbes B., Abbes F., Guo Y.Q. Analytical homogenization for stretch and bending of honeycomb sandwich plates with skin and height effects. *Composite Structures*. 2015, vol. 120, pp. 406–416.
37. Shi G., Tong P. Equivalent transverse shear stiffness of honeycomb cores. *Int J Solids Struct.*, 1995, no. 32, pp. 1383–1393.
38. Niknejad A., Abedi M.M., Liaghat G.H., Nejad M.Z. Prediction of the mean folding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by theoretical analysis. *Mater Des.*, 2012, no. 37, pp. 144–151.
39. Güden M., Kavi H. Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes. *Thin-Walled Struct.*, 2006, no. 44, pp. 739–750.
40. Lin J.S., Wang X., Lu G. Crushing characteristics of fiber reinforced conical tubes with foam-filler. *Composite Structures*, 2014, no. 116, pp. 18–28.

41. Zhu G., Li S., Sun G., Li G., Li Q. On design of graded honeycomb filler and tubal wall thickness for multiple load cases. *Thin-Walled Struct.*, 2016, no. 109, pp. 377–389.
42. Wang Chengjian, Wang Cheng, Li Z., He Y., Zhang Z., Zhang Y. Mechanical properties of novel 3D printing 316L stainless steel honeycomb structure reinforced aluminum matrix composites. *Intermetallics*, 2025, no. 181, pp. 743–753.
43. Prawoto Y. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: a structural review on the negative Poisson's ratio. *Comput Mater Sci.*, 2012, no. 58, pp. 140–153.
44. Zied K., Osman M., Elmahdy T. Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores. *Phys Status Solidi B*, 2015, no. 252, pp. 2685–2692.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шипелев Иван Леонидович – аспирант, старший преподаватель, Высшая школа промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация),

✉ iva-shipelev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2835-893X>

Ivan L. Shipelev, Postgraduate Student, Senior Lecturer, of the High School of Industrial and Civil Construction, Pacific National University (Khabarovsk, Russian Federation).

Тишков Николай Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация),

✉ n.tishkov87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2891-4926>

Nikolay L. Tishkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the High School of Industrial and Civil Construction, Pacific National University (Khabarovsk, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 30.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 02.06.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

Научная статья

УДК 691.32

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/105-116>

Сравнение эффективности модификации цементных бетонов золой-уноса и молотым доменным гранулированным шлаком

Надежда Игоревна Никора, Александр Леонович Маилян, Дарья Юрьевна Рыженкова, Валерия Сергеевна Сытик, Анастасия Михайловна Ельшаева✉, Алексей Олегович Косых, Даниил Олегович Бахарев

Донской государственный технический университет,

Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ anastasiya_el05@mail.ru

Аннотация. Проблема утилизации таких промышленных отходов, как зола-уноса (ЗУ) и молотый доменный гранулированный шлак (МДГШ), в настоящее время является актуальной и требует решений, направленных на её устранение. Целью данного исследования является разработка экологичных и экономически эффективных составов бетона, изготовленных с применением промышленных отходов. Всего было изготовлено 13 экспериментальных составов бетона с заменой части цемента на ЗУ и МДГШ от 0 до 30% с шагом 5%. Исследовались свойства бетонных смесей и бетонов. По результатам экспериментальных исследований было установлено, что оптимальное количество замены части цемента как для ЗУ, так и для МДГШ составляет 15%. Прирост прочности на сжатие для бетона с ЗУ составил 18,6%, для бетона с МДГШ – 14,4%. Значения водопоглощения снизились на 15,2 и 13,7% соответственно. Полученные в ходе исследования результаты доказывают, что предложение по применению промышленных отходов в виде золы-уноса и молотого доменного гранулированного шлака при изготовлении бетонов является рациональным и позволяет решить проблему их утилизации. Сами же бетоны обладают улучшенными свойствами и являются более экологичными и экономичными.

Ключевые слова: зола-уноса, молотый доменный гранулированный шлак, бетон, прочность на сжатие, промышленные отходы

Для цитирования: Никора Н.И., Маилян А.Л., Рыженкова Д.Ю., Сытик В.С., Ельшаева А.М., Косых А.О., Бахарев Д.О. Сравнение эффективности модификации цементных бетонов золой-уноса и молотым доменным гранулированным шлаком // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 105–116.

Original article

Comparison of the efficiency of modification of cement concrete with fly ash and ground blast furnace granulated slag

Nadezhda I. Nikora, Alexander L. Mailyan, Daria Y. Ryzhenkova, Valeria S. Sytik, Anastasia M. Yelshaeva✉, Alexey O. Kosykh, Daniil O. Bakharev

Don State Technical University,

Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ anastasiya_el05@mail.ru

Abstract. The problem of utilization of such industrial waste as fly ash (FA) and ground blast furnace granulated slag (GBGS) is currently relevant and requires solutions aimed at its elimination. The purpose of this study is to develop environmentally friendly and cost-effective concrete compositions manufactured using industrial waste. A total of 13 experimental concrete compositions were manufactured with a portion of cement

replaced with FA and GBGS from 0 to 30% with a step of 5%. The properties of concrete mixtures and concretes were studied. Based on the results of experimental studies, it was found that the optimal amount of replacement of a portion of cement for both FA and GBGS is 15%. The increase in compressive strength for concrete with FA was 18.6%, for concrete with GBGS – 14.4%. Water absorption values decreased by 15.2 and 13.7%, respectively. The results obtained during the study prove that the proposal to use industrial waste in the form of fly ash and ground blast furnace granulated slag in the production of concrete is rational and allows solving the problem of their disposal. The concretes themselves have improved properties and are more environmentally friendly and economical.

Keywords: fly ash, ground blast furnace granulated slag, concrete, compressive strength, industrial waste

For citation: Nikora N.I., Mailyan A.L., Ryzhenkova D.Y., Sytik V.S., Yelshaeva A.M., Kosykh A.O., Bakharov D.O. Comparison of the efficiency of modification of cement concrete with fly ash and ground blast furnace granulated slag. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 105–116. (In Russ.).

Введение

В настоящее время проблема утилизации отходов промышленности является одной из самых актуальных и требует поиска решений, направленных на её устранение. Современное строительное материаловедение предлагает множество вариантов решения данной проблемы, которые основаны на применении отходов промышленности при изготовлении новых видов строительных материалов [1, 2]. Особенно развита тема утилизации различных видов отходов при изготовлении бетонных композитов. Зола-уноса, являющаяся отходом теплоэлектростанций, и молотый доменный гранулированный шлак, который является техногенным отходом выплавки железной руды, имеют химический состав, подходящий для применения в технологии бетонных композитов вместо части цемента [3, 4].

В работе [5] доказана перспективность применения золы-уноса (ЗУ) как альтернативной добавки, заменяющей часть цемента и увеличивающей прочностные свойства бетона в 1,3 раза. В исследовании [6] авторами были разработаны составы облегчённых бетонов с 40% содержания ЗУ и улучшенными эксплуатационными характеристиками. Введение ЗУ снижает процессы трещинообразования и величину усадки в процессе твердения бетона [7]. Также ЗУ нашла широкое применение в технологии геополимерных бетонов [8]. Смесь ЗУ и золы жома сахарного тростника в соотношении 90/10, затворённая щелочным активатором после отверждения, образует композит с прочностью на сжатие до 75 МПа [9]. Аналогично и в других исследованиях при оптимальном подборе рецептуры удалось получить геополимерные композиты на основе ЗУ с высокими прочностными свойствами [10, 11].

Молотый доменный гранулированный шлак (МДГШ) также активно применяется в качестве минеральной добавки, заменяющей часть цемента [12]. Введение 30% МДГШ в состав самоуплотняющихся бетонов позволяет снизить их усадку и сохранить прочностные свойства на требуемом уровне [13]. В исследовании [14] МДГШ в количестве 10% обеспечивает прирост прочности на сжатие в 7-суточном возрасте до 11%. Также на основе шлака разработано множество геополимерных композитов с улучшенными эксплуатационными характеристиками и повышенной стойкостью к различным агрессивным воздействиям [15–17].

Таким образом, научной новизной исследования будут являться новые составы бетонов с добавками золы и шлака и зависимости между свойствами бетона и количеством вводимых минеральных добавок.

Целью данного исследования является разработка экологичных и экономически эффективных составов бетонов, модифицированных минеральными добавками в виде золы-уноса и молотого доменного гранулированного шлака.

Основные задачи исследования:

- проведение экспериментальных исследований по подбору оптимальной рецептуры экономичного и экологичного бетона, модифицированного золой и шлаком;
- определение характеристик бетона, модифицированного различным количеством золы-уноса и молотого доменного гранулированного шлака.

Материалы и методы

Для изготовления экспериментальных образцов бетона применялось следующее основное сырье:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (ЦЕМРОС, г. Москва, Россия);
- гранитный щебень (ООО «Солнцедар-Дон», г. Ростов-на-Дону, Россия);
- песок кварцевый (ООО «Дон Ресурс», г. Кагальник, Россия).

Свойства сырьевых компонентов представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Свойства сырьевых компонентов
Properties of raw materials components

Наименование компонента	Свойство	Фактическое значение
Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н	Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	3402
	Нормальная густота, %	29,7
	Сроки схватывания, мин. – начало – конец	150 240
	Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	53,9
Гранитный щебень	Размер зёрен, мм	5–20
	Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1390
	Истинная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	2565
	Дробимость, % по массе	11,8
	Содержание зёрен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм, % по массе	10,9
Песок кварцевый	Модуль крупности	1,85
	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0,52
	Истинная плотность зёрен, $\text{кг}/\text{м}^3$	2591
	Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1457

Гранулометрический состав крупного и мелкого заполнителя представлен на рисунке 1.

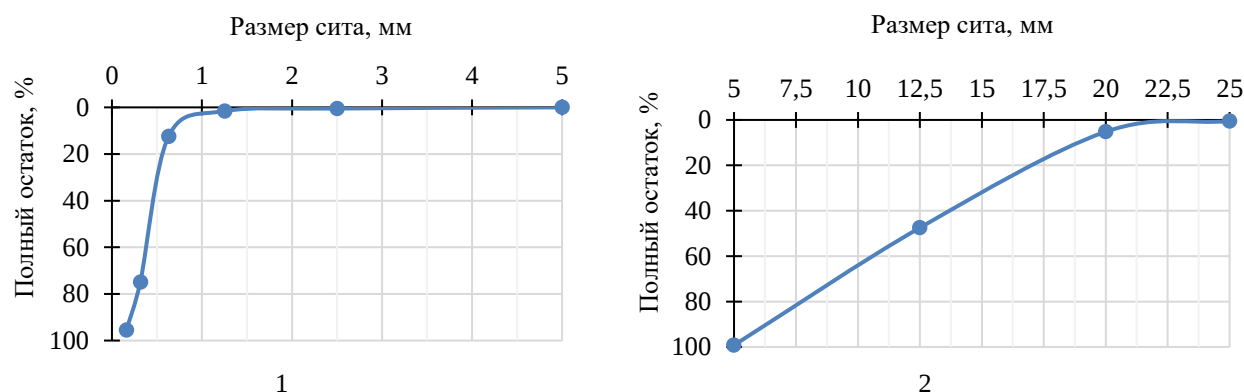


Рис. 1. Гранулометрический состав:
1 – песок; 2 – щебень

Fig. 1. Granulometric composition: 1 – sand; 2 – crushed stone

Щебень имел размер зёрен от 5 до 20 мм (рис. 1.2), модуль крупности кварцевого песка составил 1,85 (рис. 1.1).

В качестве модифицирующих добавок, заменяющих часть цемента, применялись зола-уноса (Завод № 7, г. Тула, Россия) и молотый доменный гранулированный шлак (НЛМК, г. Липецк, Россия). Химические составы золы и шлака представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Химические составы золы и шлака
Chemical compositions of ash and slag

Оксид	Содержание в золе, мас. %	Содержание в шлаке, мас. %
SiO ₂	50,1	37,81
Al ₂ O ₃	37,1	5,95
Fe ₂ O ₃	6,01	0,31
CaO	2,79	49,3
TiO ₂	1,39	2,01
K ₂ O	1,05	0,32
MgO	0,43	3,16
SO ₃	0,72	–
ZrO ₂	0,13	0,03
P ₂ O ₅	0,1	0,01
SrO	0,04	–
ZnO	0,04	–
Cr ₂ O ₃	0,02	–
MnO	0,02	–
Y ₂ O ₃	0,02	–
Na ₂ O	0,02	1,1
PbO	0,01	–
CuO	0,005	–
NiO	0,001	–
Rb ₂ O	0,004	–

Эффективность модифицирующих добавок оценивалась путём их введения в состав бетона вместо части цемента в количестве от 5 до 30% с шагом 5%.

Также дополнительно применялась пластифицирующая добавка ПК1 на поликарбонатной основе (ГК «Полипласт», г. Москва, Россия).

Экспериментальные составы бетонных смесей с различным количеством золы-уноса (ЗУ) и молотого доменного гранулированного шлака (МДГШ) представлены в таблице 3.

Изготовление экспериментальных образцов бетона, модифицированных ЗУ и МДГШ, осуществлялось следующим образом. Все сырьевые компоненты дозировались в соответствии с рецептурой и загружались в лабораторный бетономеситель в последовательности: цемент, песок, модифицирующая добавка и вода с растворённым в ней пластификатором. Далее смесь сырьевых компонентов перемешивалась до однородной консистенции. После получения однородной растворной смеси в неё вводился крупный заполнитель и всё снова перемешивалось. Готовая смесь заливалась в формы, которые после заливки уплотнялись на виброплощадке 60 секунд. Поверхность образцов заглаживалась и выравнивалась. Через сутки образцы вынимались из форм и помещались в камеру нормального твердения на оставшиеся 27 суток.

Всего было изготовлено 78 кубов размером 100×100×100 мм.

Осадка конуса бетонных смесей определялась в соответствии с требованиями. Для определения осадки применялись металлический конус, металлический лист и штыковка. Перед определением осадки все инструменты протирались влажной тканью. Бетонная смесь загружалась в металлический конус в 3 слоя. Каждый их трёх слоёв уплотнялся 25 ударами штыковки. Перед снятием конуса с его верхней части убирались излишки смеси и поверхность заглаживалась. Затем конус быстрым и плавным движением поднимался вверх и устанавливался рядом с осевшей бетонной смесью. Осадка оценивалась как разница между высотой металлического конуса и наивысшей точкой осевшей бетонной смеси.

Таблица 3 / Table 3

Экспериментальные составы бетонных смесей
Experimental compositions of concrete mixtures

Тип состава	Цемент, кг/м³	Песок, кг/м³	Вода, л/м³	Щебень, кг/м³	Модифицирующая добавка		ПК1, кг/м³
					кг/м³	% вместо цемента	
Зола-уноса							
Контрольный	394	775	196	1098	0	0	3,83
ЗУ5	374,3	775	196	1098	19,7	5	3,83
ЗУ10	354,6	775	196	1098	39,4	10	3,83
ЗУ15	334,9	775	196	1098	59,1	15	3,83
ЗУ20	315,2	775	196	1098	78,8	20	3,83
ЗУ25	295,5	775	196	1098	98,5	25	3,83
ЗУ30	275,8	775	196	1098	118,2	30	3,83
Молотый гранулированный доменный шлак							
МДГШ5	394	775	196	1098	19,7	5	3,83
МДГШ10	374,3	775	196	1098	39,4	10	3,83
МДГШ15	354,6	775	196	1098	59,1	15	3,83
МДГШ20	334,9	775	196	1098	78,8	20	3,83
МДГШ25	315,2	775	196	1098	98,5	25	3,83
МДГШ30	295,5	775	196	1098	118,2	30	3,83

Прочность на сжатие определялась в соответствии с требованиями методики. Образцы кубы устанавливались в лабораторную установку «П–50», нагрузка подавалась со скоростью нарастания $0,6 \pm 0,2$ МПа/с. Прочность на сжатие бетона вычислялась по формуле (1):

$$R = \alpha \frac{F}{A}, \quad (1)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н;

A – площадь рабочего сечения образца, мм²;

α – коэффициент, учитывающий размеры образцов (для образцов со стороной 100 мм $\alpha = 0,95$).

Определение водопоглощения модифицированных бетонов осуществлялось в соответствии с требованиями. Значение водопоглощения вычислялось по формуле (2):

$$W = \frac{m_b - m_c}{m_c} \cdot 100, \quad (2)$$

где m_b – масса насыщенного водой образца, г;

m_c – масса сухого образца, г.

Результаты

Результаты определения осадки конуса бетонных смесей, модифицированных золой-уноса и молотым доменным гранулированным шлаком, представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что применение ЗУ и МДГШ в качестве частичной замены цемента снижает осадку бетонных смесей. Зависимость изменения осадки бетонных смесей от количества модифицирующей добавки носит прямой характер. Чем больше добавки, тем меньше осадка конуса бетонных смесей. При максимальном количестве 30% ЗУ осадка конуса равна 8 см, что на 52,9% меньше в сравнении с контрольной смесью. При 30% МДГШ осадка конуса бетонной смеси составила 6 см, что на 64,7% меньше состава без минеральных добавок. Данный эффект в первую очередь связан с тем, что частицы золы и шлака имеют более пористую структуру и на их смачивание уходит большее количество воды. Снижение осадки бетонных смесей при введении минеральных модифицирующих добавок подтверждается и рядом других исследований [18, 19].

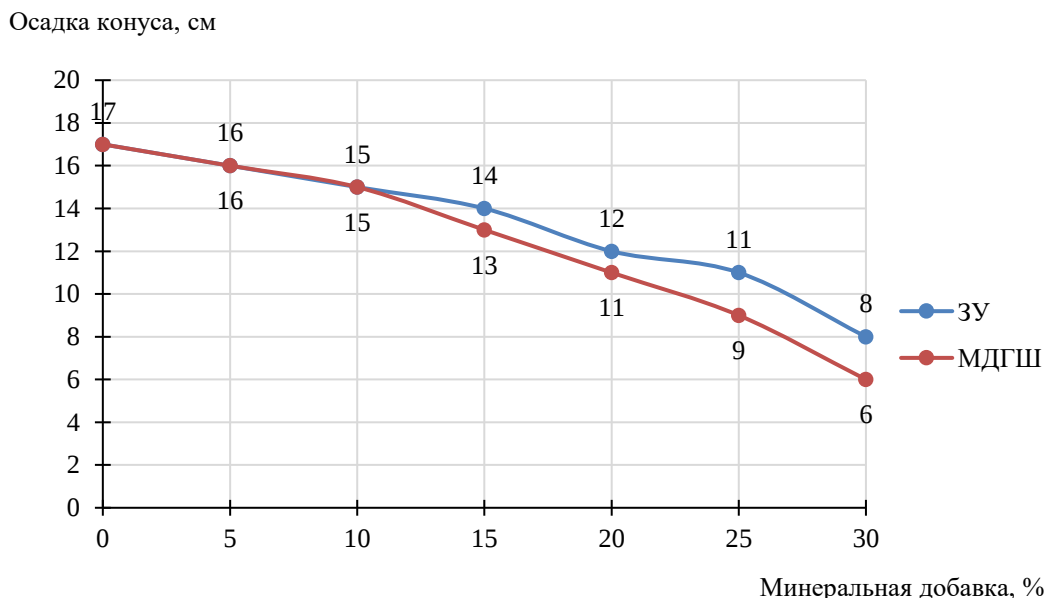


Рис. 2. Осадка конуса бетонной смеси при различном содержании 3У и МДГШ

Fig. 2. Sedimentation of the cone of the concrete mixture with different contents of FA and GBFGS

Далее, на рисунках 3 и 4 представлены результаты определения прочности на сжатие и водопоглощения бетонов с различным содержанием 3У и МДГШ.

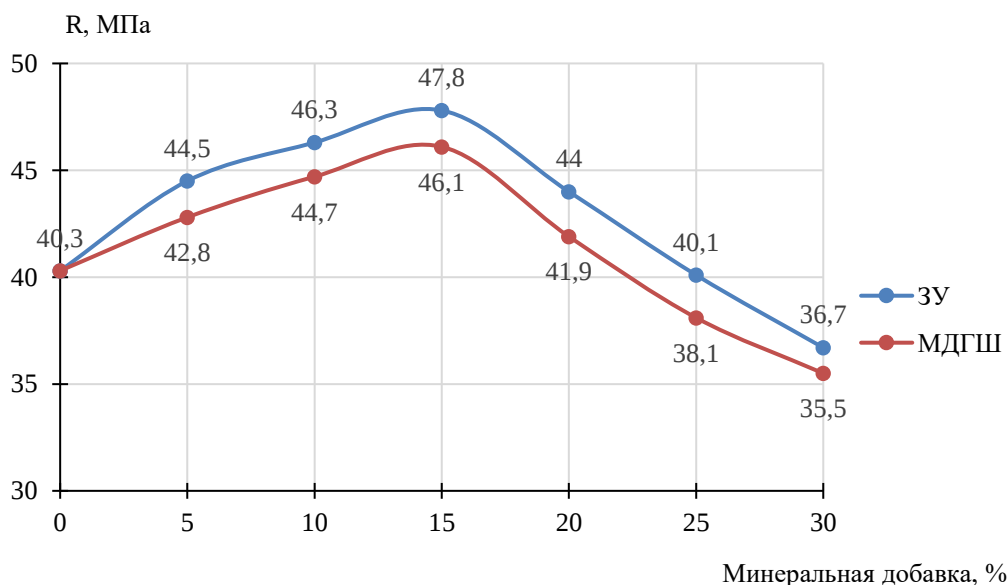


Рис. 3. Прочность на сжатие бетона при различном содержании 3У и МДГШ

Fig. 3. Compressive strength of concrete with different contents of FA and GBFG

Согласно рисунку 3, максимальные значения прочности на сжатие зафиксированы у бетонов с 15% 3У и МДГШ. Максимальное значение прочности на сжатие бетона с 3У составило 47,8 МПа, что на 18,6% больше, чем у контрольного состава. У бетона с МДГШ максимальное значение прочности на сжатие составило 46,1 МПа, что на 14,4% больше, чем у контрольного состава. В целом, положительное влияние модификации 3У и МДГШ на прочностные свойства композита наблюдается при замене до 20% цемента. Дальнейшее увеличение содержания 3У и МДГШ приводит к снижению прочностных свойств бетонного композита. Так, при максимальном содержании 3У и МДГШ прочность бетона на сжатие снизилась на 8,9% и 11,9% соответственно.

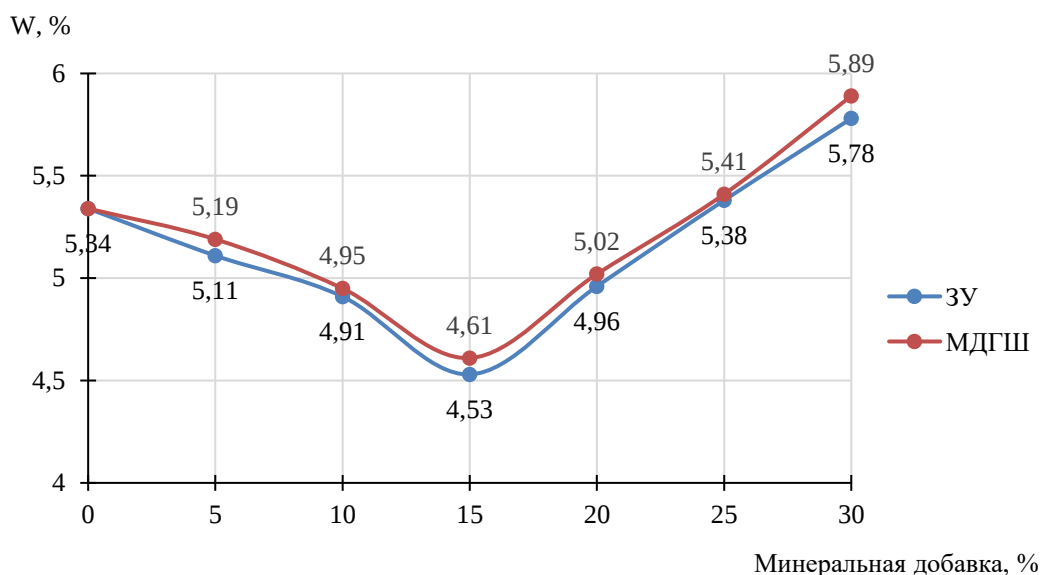


Рис. 4. Водопоглощение бетона при различном содержании 3У и МДГШ

Fig. 4. Water absorption of concrete with different contents of FA and GBFGS

Как и в случае с прочностью на сжатие, наилучшие характеристики бетона зафиксированы при модификации 3У и МДГШ в количестве 15%. Минимальное значение водопоглощения для бетона с 3У составило 4,53% и для бетона с МДГШ – 4,61%, что, соответственно, на 15,2% и 13,7% меньше значения водопоглощения контрольного состава. Введение модифицирующих добавок до 20% положительно влияет на водопоглощение бетона, способствуя его снижению. При более высоком содержании 3У и МДГШ наблюдается обратный эффект.

Положительный эффект от модификации бетонов 3У и МДГШ в оптимальных количествах (до 20%) объясняется свойствами самих минеральных добавок. Химический состав золы-уноса и молотого доменного гранулированного шлака характеризуется большим содержанием диоксида кремния (SiO_2) – 50,1% и 37,81% соответственно. Диоксид кремния активно вступает в реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который образуется в процессе гидратации цемента [20]. В результате взаимодействия активных компонентов золы и шлака с продуктами гидратации цемента образуется больше гидратированного силиката кальция и гидратированного алюмината кальция, что уменьшает внутренние поры бетона и делает внутреннюю структуру бетона более плотной и прочной. Соответственно, более высокие приросты прочности на сжатие и низкие значения водопоглощения при модификации золой-уноса, нежели при модификации молотым доменным гранулированным шлаком, определяются большим содержанием SiO_2 в её составе. Ухудшения свойств бетонных композитов при введении минеральных добавок более 20% связаны с тем, что снижается щёлочность жидкой фазы и не все активные компоненты добавок могут вступить в химические реакции. Вследствие чего во всём композите появляются зоны пониженной плотности, что и приводит к ухудшению его свойств [21–24].

Результаты, полученные в данном исследовании, имеют хорошую сопоставимость с работами других авторов. Например, применение 20% золы-уноса позволило повысить прочность бетона на сжатие до 13,22% и улучшить его стойкость к замерзанию и оттаиванию в морской воде [25]. Введение молотого доменного гранулированного шлака до 30% вместо части цемента улучшило прочность бетона на сжатие до 39% и повысило его кислотостойкость [26].

Таким образом, разработанные в данном исследовании цементные композиты с высоким содержанием техногенных отходов, введённых взамен части портландцемента, имеют высокую актуальность, в особенности для тех регионов, где существует проблема скапливания промышленных отходов [27, 28]. Они обладают достаточными прочностными свойствами и имеют обширную область применения в реальной строительной практике: их можно

активно применять для изготовления различных заводских изделий, а также в условиях строительной площадки. К основным преимуществам бетонов с ЗУ и МДГШ можно отнести их высокую экологичность, низкое углеродное воздействие на окружающую среду и экономичность [29, 30].

Выводы

Исследованы свойства бетонных смесей и бетонов, модифицированных золой-уноса и молотым доменным гранулированным шлаком. Определено оптимальное количество замены части цемента данными минеральными модифицирующими добавками.

1. Введение ЗУ и МДГШ вместо части цемента уменьшает осадку бетонных смесей. Зависимость снижения осадки конуса от количества модифицирующих добавок носит прямой характер. Минимальные значения осадки конуса зафиксированы при добавлении 30% ЗУ и МДГШ – 8 см и 6 см соответственно.

2. Оптимальное количество ЗУ и МДГШ – 15%. Приросты прочности на сжатие составили 18,6% и 14,4% соответственно. Водопоглощение снизилось на 15,2% и 13,7% соответственно. Модификация бетона ЗУ является наиболее эффективным рецептурным решением, так как обеспечивает большие приросты прочностных свойств бетона в сравнении с модификацией МДГШ.

3. Модификация бетона ЗУ и МДГШ до 20% позволяет получить экономичный и экологичный композит с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А.Л. Маилан – окончательная редакция статьи, её согласование со всеми авторами; Д.О. Бахарев – изготовление образцов, проведение экспериментов, анализ результатов; В.С. Сытик – обработка данных эксперимента, построение графиков и таблиц для статьи; А.М. Ельшаева, Н.И. Никора – написание статьи; А.О. Косых – сбор, анализ и интерпретация материала для статьи; Д.Ю. Рыженкова – формулировка цели, задач исследования, общее руководство.

A.L. Mailyan – the final revision of the article, its coordination with all authors; D.O. Bakharev – the production of samples, experiments, analysis of results; V.S. Sytik – experimental data processing, construction of graphs and tables for the article; A.M. Elshaeva, N.I. Nikora – writing of the article; A.O. Kosykh – collection, analysis and interpretation of the material for the article; D.Yu. Ryzhenkova – formulation of the purpose, objectives of the study, general guidance.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Захаров А.А., Лейцин В.Н. Зола-уноса при производстве бетонов различного назначения и сухих строительных смесей // Строительство и реконструкция. 2023. № 5(109). С. 132–147. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-132-147>.
2. Астафьева О.Е. Применение золошлаковых отходов в промышленности строительных материалов // Уголь. 2024. № 2(1177). С. 85–88. DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-85-88>.
3. Макаренко С.В., Лозовский Б.М., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Влияние активных пуццолановых наполнителей на свойства мелкозернистого цементного бетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 3(53). С. 39–46.
4. Путилова И.В. Современное состояние проблемы обращения с золошлаками ТЭС в России и за рубежом // Альтернативная энергетика и экология. 2023. № 1(406). С. 51–62. DOI: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2023.01.051-062>.
5. Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х., Харебов Г.Х. Влияние режима перемешивания компонентов при изготовлении смесей с добавкой золы-уноса // Вектор ГеоНаук. 2019. Т. 2, № 1. С. 83–89. DOI: <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10011>.

6. Шацкая В.А., Шитиков Е.С., Шацкий С.В. Разработка методов получения цементобетонных материалов повышенного качества с использованием техногенных отходов ТЭЦ // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36, № 6(255). С. 94–97.
7. Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н., Романенко М.И. Влияние модификаторов структуры шлакощелочного вяжущего на трещинообразование // Инженерный вестник Дона. 2021. № 7(79). С. 347–365.
8. Щербань Е.М. Современное состояние вопроса геополимерных бетонов в России и за рубежом // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. 18, № 3(29). С. 42–54. DOI: <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2022.33.96.005>.
9. Rihan M.A.M., Alahmari T.S., Onchiri R.O., Gathimba N., Sabuni B. Impact of alkaline concentration on the mechanical properties of geopolymer concrete made up of fly ash and sugarcane bagasse ash // Sustainability [Internet]. 2024. Vol. 16. P. 28–41. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072841>.
10. Hussain S., Matthews J., Amritphale S., Edwards R., Matthews E., Paul N., Kraft J. Influence of steel and poly vinyl alcohol fibers on the development of high-strength geopolymer concrete // Minerals [Internet]. 2024. Vol. 14. P. 1007. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14101007>.
11. Luo J., Shi X., Wang Q., Dai J., Deng X., Xue Y. Study on improving measures of mechanical properties of geopolymer materials and its effect on CO₂ emission // Polymers [Internet]. 2023. Vol. 15. P. 1699. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071699>.
12. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Мордовцева М.В. Молотый гранулированный доменный шлак – средство повышения эффективности и долговечности бетонов // Цемент и его применение. 2023. № 2. С. 62–69.
13. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А., Саденко С.М. Влияние доменного гранулированного шлака на свойства мелкозернистого самоуплотняющегося бетона // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8(80). С. 486–494.
14. Смирнов Д.С., Мавлиев Л.Ф., Хузиахметова К.Р., Мотыйгуллин И.Р. Влияние минеральной добавки на основе молотого доменного шлака на свойства бетонов и бетонных смесей // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 4(62). С. 61–69. DOI: https://doi.org/10.52409/20731523_2022_4_61.
15. Cheng J., Qin Y., Yao Z., Luo L., Qu C. Study on the chloride-sulfate resistance of a metakaolin-based geopolymer mortar // Materials [Internet]. 2024. Vol. 17. P. 5045. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17205045>.
16. Girish M.G., Shetty K.K., Nayak G., Kamath K. Evaluation of mechanical, ecological, economical, and thermal characteristics of geopolymer concrete containing processed slag sand // Sustainability [Internet]. 2024. Vol. 16. P. 7402. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16177402>.
17. Liu M., Liu H., Hua M., Chen C., Wang X., Guo X., Ma T. Potential for recycling metakaolin/slag-based geopolymer concrete of various strength levels in freeze-thaw conditions // Materials [Internet]. 2024. Vol. 17. P. 1944. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17091944>.
18. Akbulut Z.F., Yavuz D., Tawfik T.A., Smarzewski P., Guler S. Examining the workability, mechanical, and thermal characteristics of eco-friendly, structural self-compacting lightweight concrete enhanced with fly ash and silica fume // Materials [Internet]. 2024. Vol. 17. P. 3504. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17143504>.
19. Ключев А.В., Ключев С.В., Щекина Н.А. Композиционные смеси с использованием природного и техногенного сырья // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. Т. 3, № 2(10). С. 7–11. DOI: https://doi.org/10.51639/2713-0576_2023_3_2_7.
20. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Экспериментально-теоретические предпосылки повышения прочности цементного камня тонкодисперсными минеральными добавками и добавкой, содержащей фуллерены // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 1(49). С. 97–102.
21. Зазнаева Е.П., Демиденко Е.И. Роль тонкодисперсных минеральных добавок в составе сухих строительных смесей // Техника и технологии строительства. 2018. № 3(15). С. 8–12.
22. Абдуллаев М.А.В., Абдуллаев А.М., Абдуллаев Р.М. Высокопрочные мелкозернистые бетоны на основе комплексной нанодобавки // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 6(786). С. 78–93. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-786-6-78-93>.

23. Халюшев А.К., Прудников В.В., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Оценка эффективности комбинирования минеральных добавок в мелкозернистом бетоне // Наукоедение. 2017. Т. 9, № 5. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/25TVN517.pdf>.
24. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Коробкин А.П., Налимова А.В., Серебряная И.А., Нажуев М.П. Разработка состава композиционного портландцемента на основе золошлаковой смеси Новочеркасской ГРЭС // Вестник СевКавГТИ. 2017. № 3(30). С. 148–153.
25. He J., Sun C., Wang X. Study on the effect of fly ash on mechanical properties and seawater freeze-thaw resistance of seawater sea sand concrete // *Buildings [Internet]*. 2024. Vol. 14. P. 2191. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14072191>.
26. Ahmad J., Martínez-García R., Szelag M., de Prado-Gil J., Marzouki R., Alqurashi M., Hussein E.E. Effects of steel fibers (SF) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) on recycled aggregate concrete // *Materials [Internet]*. 2021. Vol. 14. P. 7497. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247497>.
27. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Liseitsev Yu.L., Timokhin R.A., Bituyev A.V., Zaiakhanov M.Ye., Mochalov A.V. Composite binders for concretes with improved shock resistance // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. № 1(85). С. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.85.3>.
28. Konovalova N., Pankov P., Bespolitov D., Petukhov V., Panarin I., Fomina E., Lushpey V., Fatkulin A., Othman A. Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02318>.
29. Алексейко Л.Н., Таскин А.В. О комплексной переработке золошлаковых отходов энергетики // Экология и развитие общества: Труды IX Международной конференции, Санкт-Петербург, 19–24 июля 2005 года. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2005. С. 12–21.
30. Титова Л.А., Титов М.Ю., Бейлина М.И. [и др.] Эффективность применения гранулированных доменных шлаков при производстве бетонных смесей и бетонов // *Бетон и железобетон*. 2021. № 2(604). С. 16–20.

REFERENCES

1. Puzatova A.V., Dmitrieva M.A., Zakharov A.A., Leitsin V.N. Fly ash in the production of concrete for various purpose and dry construction mixtures. *Building and Reconstruction*, 2023, no. 5(109), pp. 132–147. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-132-147>
2. Astafyeva O.E. Application of ash and slag waste in the building materials industry. *Ugol'*, 2024, no. 2(1177), pp. 85–88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-85-88>
3. Makarenko S.V., Lazovskiy B.M., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. The effect of active pozzolanic fillers on the properties of fine-grained cement concrete. *News KSUAE*, 2020, no. 3(53), pp. 39–46. (In Russ.).
4. Putilova I.V. The current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2023, no. 1(406), pp. 51–62. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2023.01.051-062>
5. Dmitrak Y.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.Z. Influence of the mode of mixing of components while manufacturing mixtures with additive ash down. *Vector of Geosciences*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 83–89. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10011>
6. Shatskaya V.A., Shitikov E.S., Shatsky S.V. Development of methods for producing high-quality cement-concrete materials using technogenic waste of thermal power plant. *Advances in chemistry and chemical technology*, 2022, vol. 36, no. 6(255), pp. 94–97. (In Russ.).
7. Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovnina I.N., Romanenko M.I. Influence of slag-alkaline binder structure modifiers on crack formation. *Engineering Journal of Don*, 2021, no. 7(79), pp. 347–365. (In Russ.).
8. Shcherban' E.M. The current state of the issue of geopolymer concrete in russia and abroad. *Herald of GSTOU. Engineering Sciences*, 2022, vol. 18, no. 3(29), pp. 42–54. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2022.33.96.005>
9. Rihan M.A.M., Alahmari T.S., Onchiri R.O., Gathimba N., Sabuni B. Impact of alkaline concentration on the mechanical properties of geopolymer concrete made up of fly ash and sugarcane bagasse ash. *Sustainability [Internet]*, 2024, vol. 16, pp. 28–41. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072841>
10. Hussain S., Matthews J., Amritphale S., Edwards R., Matthews E., Paul N., Kraft J. Influence of steel and poly vinyl alcohol fibers on the development of high-strength geopolymer concrete. *Minerals [Internet]*, 2024, vol. 14, p. 1007. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14101007>

11. Luo J., Shi X., Wang Q., Dai J., Deng X., Xue Y. Study on improving measures of mechanical properties of geopolymer materials and its effect on CO₂ emission. *Polymers [Internet]*, 2023, vol. 15, p. 1699. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071699>
12. Ivanov I.M., Kramar L.Y., Mordovtseva M.V. Ground granulated blast-furnace slag as a means of increasing the efficiency and durability of concrete. *Cement and its Applications*, 2023, no. 2, pp. 62–69. (In Russ.).
13. Korovkin M.O., Korotkova A.A., Eroshkina N.A., Sadenko S.M. Study of granulated blast furnace slag on the properties of fine-grained self-compacting concrete. *Engineering Journal of Don*, 2021, no. 8(80), pp. 486–494. (In Russ.).
14. Smirnov D.S., Mavliev L.F., Khuziakhmetova K.R., Motygullin I.R. Effect of mineral additive based on ground blast furnace slag on the properties of concrete and concrete mixtures. *News KSUAE*, 2022, no. 4(62), pp. 61–69. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.52409/20731523_2022_4_61
15. Cheng J., Qin Y., Yao Z., Luo L., Qu C. Study on the chloride-sulfate resistance of a metakaolin-based geopolymer mortar. *Materials [Internet]*, 2024, vol. 17, p. 5045. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17205045>
16. Girish M.G., Shetty K.K., Nayak G., Kamath K. Evaluation of mechanical, ecological, economical, and thermal characteristics of geopolymer concrete containing processed slag sand. *Sustainability [Internet]*, 2024, vol. 16, p. 7402. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16177402>
17. Liu M., Liu H., Hua M., Chen C., Wang X., Guo X., Ma T. Potential for recycling metakaolin/slag-based geopolymer concrete of various strength levels in freeze-thaw conditions. *Materials [Internet]*, 2024, vol. 17, p. 1944. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17091944>
18. Akbulut Z.F., Yavuz D., Tawfik T.A., Smarzewski P., Guler S. Examining the workability, mechanical, and thermal characteristics of eco-friendly, structural self-compacting lightweight concrete enhanced with fly ash and silica fume. *Materials [Internet]*, 2024, vol. 17, p. 3504. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17143504>
19. Klyuev A.V., Klyuev S.V., Shchekina N.A. Composite mixtures using natural and man-made raw materials. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2023, vol. 3, no. 2(10), pp. 7–11. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.51639/2713-0576_2023_3_2_7
20. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Experimental and theoretical prerequisites for increasing the strength of cement stone with finely dispersed mineral additives and an additive containing fullerenes. *Vestnik RGUPS, Rostov State Transport University*, 2013, no. 1(49), pp. 97–102. (In Russ.).
21. Zaznaeva E.P., Demidenko E.I. The role of fine mineral additives in the composition of dry construction mixtures. *Construction Equipment and Technologies*, 2018, no. 3(15), pp. 8–12. (In Russ.).
22. Abdullaev M.A.V., Abdullaev A.M., Abdullaev R.M. High-strength fine-grained concrete based on complex nanoadditives. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2024, no. 6(786), pp. 78–93. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-786-6-78-93>
23. Khalyushev A.K., Prudnikov V.V., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Nazhnev M.P. Estimation of efficiency of mineral additives combination in the fine-grained concrete. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no 5. (In Russ.). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/25TVN517.pdf>
24. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Korobkin A.P., Nalimova A.V., Serebryanaya I.A., Nazhnev M.P. Development of a composition of composite Portland cement based on ash and slag mixture of Novocherkassk State District Power Plant. *Scientific Bulletin SevKavGT*, 2017, no. 3(30), pp. 148–153. (In Russ.).
25. He J., Sun C., Wang X. Study on the effect of fly ash on mechanical properties and seawater freeze-thaw resistance of seawater sea sand concrete. *Buildings [Internet]*, 2024, vol. 14, p. 2191. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14072191>
26. Ahmad J., Martínez-García R., Szelag M., de Prado-Gil J., Marzouki R., Alqurashi M., Hussein E.E. Effects of steel fibers (SF) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) on recycled aggregate concrete. *Materials [Internet]*, 2021, vol. 14, p. 7497. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247497>
27. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Liseitsev Yu.L., Timokhin R.A., Bituyev A.V., Zaiakhanov M.Ye., Mochalov A.V. Composite binders for concretes with improved shock resistance. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, no. 1(85), pp. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.85.3>
28. Konovalova N., Pankov P., Bespolitov D., Petukhov V., Panarin I., Fomina E., Lushpey V., Fatkulin A., Othman A. Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02318>

29. Alekseyko L.N., Taskin A.V. On complex processing of ash and slag waste of energy. *Ecology and Social Development: Proceedings of the IX International Conference*, St. Petersburg, July 19–24, 2005. International Academy of Sciences of Ecology, Human Safety and Nature, 2005. P. 12–21. (In Russ.).
30. Titova L.A., Titov M.Y., Beilina M.I. [et al.] The effectiveness of the use of granular blast furnace slags in the production of concrete mixtures and concretes. *Concrete and Reinforced Concrete*, 2021, no. 2(604), pp. 16–20. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Никора Надежда Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений», Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ nikorani@mail.ru

Nadezhda I. Nikora, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department «Construction of Unique Buildings and Structures», Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Маилян Александр Леонович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Городское строительство и хозяйство», Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ mailyan_a@sroufo.ru

Alexander L. Mailyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Departments «Urban Construction and Agriculture», Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Рыженкова Дарья Юрьевна – студент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ ryzhenkowa.dar@ya.ru

Darya Y. Ryzhenkova, Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Сытик Валерия Сергеевна – студент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ sytikv1704@mail.ru

Valeriya S. Sytik, Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Ельшаева Анастасия Михайловна – студент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ anastasiya_el05@mail.ru

Anastasia M. Yelshaeva, Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Косых Алексей Олегович – магистрант, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ cosyh.lesh@yandex.ru

Alexey O. Kosykh, Master's Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Бахарев Даниил Олегович – студент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ danipy99@mail.ru

Daniil. O. Bakharev, Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 17.03.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 11.04.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 620.193.4
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/117-142>

Обоснование к разработке методологии информационного моделирования срока службы конструкций морских гидротехнических сооружений по долговечности бетона защитного слоя арматуры

Кирилл Игоревич Патлай✉, Владимир Григорьевич Цуприк

Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация
✉ patlai.ki@dvfu.ru

Аннотация. Приведённые в статье результаты натурных обследований технического состояния бетонных поверхностей железобетонных элементов причалов морских портов указывают на неэффективность нормативно-правовой базы для количественного описания длительности жизненного цикла морских сооружений с учётом деструкции бетонных поверхностей. Основной темой исследования является совершенствование концепции моделирования расчёта срока службы поверхностей железобетонных элементов морских причалов по долговечности бетона защитного слоя в агрессивной морской среде. Обозначены предпосылки для научного обоснования методологии имитационного моделирования жизненного цикла железобетонных элементов конструкций сооружений по критерию отслоения бетона защитного слоя арматуры при её коррозии.

Ключевые слова: гидротехническое строительство, причалы, срок службы, нормирование, долговечность бетона, деструкция бетона, коррозия арматуры

Для цитирования: Патлай К.И., Цуприк В.Г. Обоснование к разработке методологии информационного моделирования срока службы конструкций морских гидротехнических сооружений по долговечности бетона защитного слоя арматуры // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 117–142.

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS,
HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

Substantiation of the methodology development for information modeling the service life of offshore hydraulic structures based the concrete durability of protective layer of reinforcement

Kirill I. Patlay✉, Vladimir G. Tsuprik

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation
✉ patlai.ki@dvfu.ru

Abstract. The results of field surveys of the technical condition of concrete surfaces of reinforced concrete elements of seaports berths presented in the article indicate the inefficiency of the regulatory framework for quantifying the life cycle of marine structures, taking into account the destruction of concrete surfaces. The main topic of the research is to improve the concept of modeling the durability of the surfaces of reinforced concrete elements of marine berths according to the criterion of concrete detachment of the reinforcement protective layer. The prerequisites for the scientific substantiation of the methodology of simulation modeling

of the life cycle of reinforced concrete structural elements of structures under the conditions of durability of concrete in an aggressive marine environment are outlined.

Keywords: hydraulic engineering, berths, service life, rationing, durability of concrete, destruction of concrete, corrosion of reinforcement

For citation: Patlay K.I, Tsuprik V.G. Substantiation of the methodology development for information modeling the service life of offshore hydraulic structures based the concrete durability of protective layer of reinforcement. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 117–142. (In Russ.).

Введение

Актуальность создания *методологии¹ нормативного расчёта долговечности железобетонных* (далее – ж/б) элементов конструкций морских причальных сооружений, работающих в агрессивных условиях замерзающих морей, для нашей страны была и остаётся достаточно высокой и в настоящее время, и в будущем. Основным источником высокой актуальности проблемы долговечности морских гидротехнических сооружений (далее – МГТС) является необходимость существенного наращивания суммарной мощности морских портов Дальневосточного, Арктического и Балтийского бассейнов, в том числе за счёт строительства новых и реконструкции существующих объектов причального фронта на трассе Северного морского пути (СМП). Согласно «Плану развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года»², утверждённому решением Правительства РФ, в развитие Федерального закона от 08.11.2007 г. № 261-ФЗ «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1] запланировано до 2035 года строительство 12 портовых терминалов и модернизация 2 существующих. Но при этом утверждённый Правительством «План развития инфраструктуры СМП...» предусматривает ежегодную актуализацию потребности в развитии государственной портовой инфраструктуры в акватории СМП в соответствии с планами добывающих компаний до декабря 2035 г.

Реальные условия строительства и эксплуатации МГТС, основу которых составляют, прежде всего, причальные конструкции перегрузочных комплексов, в суровых климатических условиях, преимущественно в морях Тихого и Северного Ледовитого океанов, требуют гарантированного обеспечения показателей надёжности и долговечности их конструкций. На протяжении многих десятилетий отечественные и зарубежные авторы этим вопросам посвятили большое число работ, которые можно подразделить на работы по *обследованию технического состояния* морских гидротехнических сооружений, по подбору ингредиентов и *составам гидротехнических бетонов* и по действию факторов агрессивности морской среды на *деструкцию бетона защитного слоя* арматуры и её коррозии.

Количественные описания *результатов обследований* фактов деструкции бетона защитного слоя арматуры и её коррозии в конструкциях портовых гидросооружений были и остаются маркерами как для калибровки разрабатываемых *составов смесей* гидротехнических бетонов, так и для *расчётных методов* количественных показателей скоростей проникновения агрессивных к компонентам бетона веществ и процессов в его массив. Учитывая, что первые бетонные причалы и сухие доки появились в бухте Золотой Рог порта Владивосток в конце 19 века, затем в течение полутора-трёх десятков лет ещё в десяти дальневосточных портах и порт-пунктах, к сороковым годам 20-го века уже были получены результаты первых отечественных обследований воздействия агрессивных факторов на поверхность бетона в море.

Периодические обследования портовых сооружений на Тихоокеанском побережье началось сразу после Великой Отечественной войны под руководством В.М. Москвина (НИИЖБ) [2], в последующие годы такими обследованиями руководили П.П. Ступаченко

¹ Здесь решение проблемы долговечности ж/б элементов МГТС рассматривается именно как методологически обоснованный путь интеграции численных описаний частных, но априори взаимосвязанных взаимовлияющих процессов деструкции и разрушения бетона защитного слоя арматуры.

² Распоряжение Правительства РФ от 21 декабря 2019 г. № 3120-р об утверждении «Плана развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года».

(ДВПИ, 1957–58; 1964–66; 1974 гг.) [3], С.Н. Алексеев (НИИЖБ, 1958–59 гг.) [4] и другие учёные.

Большие объёмы обследований портовых сооружений всех портов ДВ бассейна в 1972–76 гг. были выполнены владивостокской и сахалинской группами исследователей-водолазов ДальморНИИПроекта, а сотрудниками кафедры Гидротехники ДВПИ в 1976–88 гг. были обследованы все сооружения нового Восточного порта в бухте Находка. В трудах этих и ряда зарубежных учёных деструкция бетона к моментам обследований объяснялась, в первую очередь, превышением проектного срока службы сооружений в тяжёлых гидрометеорологических условиях морей (т.к. преобладающее количество портов было построено в 1940–60-е годы). История обследований периода до 1990 г. и краткое изложение их результатов приведены в монографии [5].

В новом столетии масштабные работы по обследованию портовых гидротехнических сооружений проводились в 2002–2003 гг. в пяти основных портах и порт-пункте Кайган на о. Сахалине ОАО «Гидротекс» под руководством А.Т. Беккера [6]. По данным этих обследований сооружений было определено, что средний износ МГТС составил 29%, при разбросе 13–65%. В последнее десятилетие продолжились обследования деградации бетонных поверхностей портовых причальных сооружений [7], а также проводились натурные исследования по оценке долговечности бетона в конструкциях морских сооружений по опыту строительства на Дальнем Востоке [8–10]. Обзор ряда результатов этих исследований приведён в работе [11].

Современные технологии изготовления ж/б элементов в морском гидротехническом строительстве характеризуются совершенствованием методик подбора компонентов бетона, включая добавки, в совокупности направленных на повышение его долговечности в условиях эксплуатации в морской среде, в том числе в холодных регионах. В то же время, несмотря на внедрение более эффективных составов бетонов, способов защиты конструкций от внешних воздействий, по данным современных обследований портовых, а в последнее десятилетие и шельфовых сооружений, более половины ж/б элементов морских гидротехнических сооружений на Дальнем Востоке имеют дефекты бетона на их поверхностях. В том числе имеются множественные участки с оголённой арматурой (рис. 1), снижающие несущую способность ж/б элементов, требующих как минимум реконструкции, а часто и проведения капитального ремонта – ограничивая тем самым их полноценную эксплуатацию.

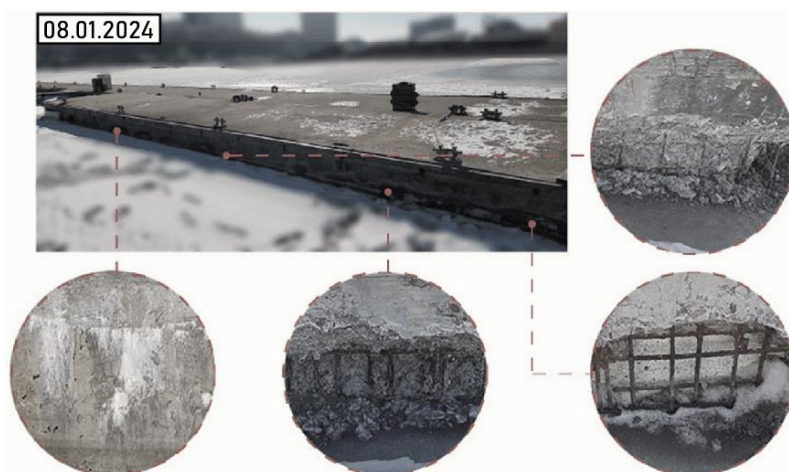


Рис. 1. Участки деградации поверхностей бетона в железобетонной надстройке причальной части Северного мола Спортивной гавани в г. Владивостоке с отслоением защитного слоя арматуры [фото К.И. Патлая]

Fig. 1. Areas of concrete surface degradation in the reinforced concrete superstructure of the berth section of the Northern pier of the Sports Harbor in Vladivostok with delamination of the protective layer of reinforcement [photo by K.I. Patlay]

В работах *производственно-технологического плана* [10–14] отмечается, что деградация бетонной поверхности вновь построенных и реконструируемых сооружений в виде отсла-

ивания на горизонтальных поверхностях, растрескивания и откалывания фрагментов бетона защитного слоя с оголением арматуры наблюдается в среднем в течение первых 7–10 лет после ввода конструкции в эксплуатацию, свидетельствуя о значительном несоответствии между проектным и фактическим сроком службы конструкций МГТС. Одной из причин этого авторы ряда работ считают недоработки в технологии изготовления элементов конструкций. В частности, в исследовании [14, с. 75] авторы отмечают, что «один из факторов, вызывающий внезапный отказ бетона, – недостаточный период выдерживания (вызревания) после изготовления конструкций». Также внезапный отказ может быть обусловлен характером внешних воздействий, например «обмерзанием конструкций морским льдом». На основании современных теоретических положений структурной теории цементных бетонов и опыта строительства морских сооружений, в работе [10, с. 25], приведена «методологическая основа определения критической зрелости структуры бетона». В качестве такой основы авторы предлагают *метод обеспечения нормируемой морозостойкости* на этапе строительства, состоящий в оценивании критерия зрелости структуры бетона и регулировании времени его выдерживания до готовности воспринимать морозные воздействия.

Результаты периодических обследований технического состояния причальных сооружений портов Тихоокеанского побережья страны, периодически проводившихся здесь со второй половины 20-го века и до настоящего времени, позволили выявить массовое несоответствие технического состояния бетонных поверхностей сооружений портовой инфраструктуры уровню нормативных требований. Такая ситуация до недавнего времени была характерна для всего Дальневосточного бассейна, где на протяжении более 5,6 тыс. морских миль расположено 22 морских торговых и 10 рыбных морских портов и порт-пунктов с суровыми зимними периодами, основная часть которых – с круглогодичной навигацией. Их доля в грузообороте портов России составляет 35%. Через эти порты сегодня проходит более 95% всех грузопотоков Дальнего Востока [6, 15]. Отсюда – роль и значение поддержания в рабочем состоянии их причального фронта в экономике региона и страны в целом, если учесть, что при нарушении сроков проведения ремонтных работ их стоимость возрастает не пропорционально времени задержки ремонта, а с существенным превышением, достигая и превышая стоимость постройки нового сооружения при двойном превышении срока задержки капитального ремонта [16]. Это делает актуальной цель повышения надёжности МГТС на основе совершенствования контроля их технического состояния и *методологии проектного* прогнозирования долговечности их ж/б конструкций.

Современное обеспечение нормативно-правового обоснования мер для расчётов долговечности железобетонных элементов конструкций МГТС

Учитывая большую стоимость, длительные проектные сроки эксплуатации МГТС и их роль в обеспечении экономической безопасности страны, в последние десятилетия система мер нормативно-правового обоснования проектно-строительного обеспечения надёжности и долговечности этих сооружений была существенно обновлена и дополнена на основании Федерального закона ФЗ № 184-ФЗ от 27.12.2002 «О техническом регулировании» [17]. Морские гидротехнические сооружения, как искусственные объекты, находящиеся в сфере применения федерального законодательства о регулировании отношений, возникающих при разработке, принятии, применении и исполнении обязательных требований к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), строительства и эксплуатации, являются объектами технического регулирования Федерального закона ФЗ № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [18]. Этот закон, определяя права и обязанности участников регулируемых его положениями отношений, является первой, *законодательной* ступенью обеспечения безопасности строительных объектов. Безопасность МГТС, процессов, осуществляемых на всех этапах их жизненного цикла, обеспечивается в процессе реализации этой задачи на её второй ступени – посредством *нормирования*: установления соответствующих требованиям технического регламента проектных

значений параметров и их качественных характеристик в течение всего жизненного цикла сооружений. Поэтому во всех процессах изысканий, проектирования, строительства, поддержания состояния таких параметров и характеристик на требуемом уровне при эксплуатации, реконструкции, текущих и капитального ремонта сооружений все субъекты, участвующие в этих процессах, обязаны руководствоваться и *выполнять требования* настоящего Федерального закона и требования, устанавливаемые системой Норм, предусмотренные его содержанием.

Как показывают результаты большинства известных обследований МГТС, тяжёлые гидрометеорологические условия их эксплуатации играют основную роль в развитии деструкционных процессов в ж/б элементах конструкций МГТС. В то же время, как указывается во многих работах [5–10, 14–16, 19], освещающих вопросы снижения сроков службы конструкций МГТС, в качестве причин износа их ж/б элементов, наряду с действием природных факторов и низким качеством проектно-изыскательских и строительных работ, отмечаются также и *нарушения условий эксплуатации сооружений*.

По мнению большого числа авторов, последний фактор является одной из важных причин снижения долговечности ж/б элементов МГТС, который проявляется в виде сокращения «расчётного срока службы» ж/б элемента при отсутствии должного контроля за состоянием сооружений и невыполнения своевременных «поддерживающих» ремонтных работ. В рамках существующей мировой практики негативные результаты действия деструкционных процессов в элементах сооружений должны получать *оценку затрат на реновационные работы*, поддерживающие сооружение в пригодном состоянии для его эффективной эксплуатации в течение всего его «жизненного цикла» [18]. На рис. 2 схематически представлена концепция жизненного цикла конструкции с входящими в эту концепцию понятиями её «долговечности» в течение её «расчётного срока службы ... до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием ... или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта или реконструкции» согласно обновлённому ГОСТу³. Также нормативно в этом документе закреплено понятие «срок службы: продолжительность нормальной эксплуатации строительного объекта с предусмотренным техническим обслуживанием и ремонтными работами (включая капитальный ремонт)».

Процесс А на рис. 2 демонстрирует *проектную концепцию* ухудшения технического состояния конструкции с течением времени, поскольку она под воздействием факторов внешней среды начинает постепенно разрушаться, по сравнению с её первоначальным состоянием, в котором она находилась при постройке (нулевой уровень отсчёта срока службы и эксплуатационной пригодности). Кривая А – идеальная траектория достижения конструкцией её *проектной долговечности* к моменту, когда конструкция достигает неприемлемого уровня повреждения, поэтому время наступления этого момента принимается за «полный» *срок службы сооружения* ($T_{p.c.}$).

Несовершенства существующих нормативных методик подбора ингредиентов бетонной смеси, их пропорций, выбора добавок, а также трудности прогнозирования действия природных агрессивных факторов на проектный состав бетона в конкретных условиях морской акватории, действия случайных механических воздействий и пр. – всё это вызывает преждевременную деструкцию бетона, появление местных разрушений (кривая Б на рис. 2). Поэтому в реальных условиях эксплуатации МГТС срок службы сооружения³ – это суммарное время всех его расчётных сроков эксплуатации (T_i) и времени капитального ремонта ($t_{к.р.}$) – до состояния его минимальной эксплуатационной пригодности, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна. Очевидно, что для ремонтов местных разрушений требуются значительные средства, при дальнейшей эксплуатации ремонтные затраты будут возрастать. Возможно, что в ряде случаев экономически выгоднее увеличить затраты на проектирование и возведение конструкции и надёжную защиту её ж/б элементов, что позволит число и стоимость ремонтов в процессе эксплуатации объектов сократить. Нормативное закрепление всех этих и ряда других понятий играет весьма существенную роль в обеспечении

³ ГОСТ 277751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

непрерывной работы сооружения.

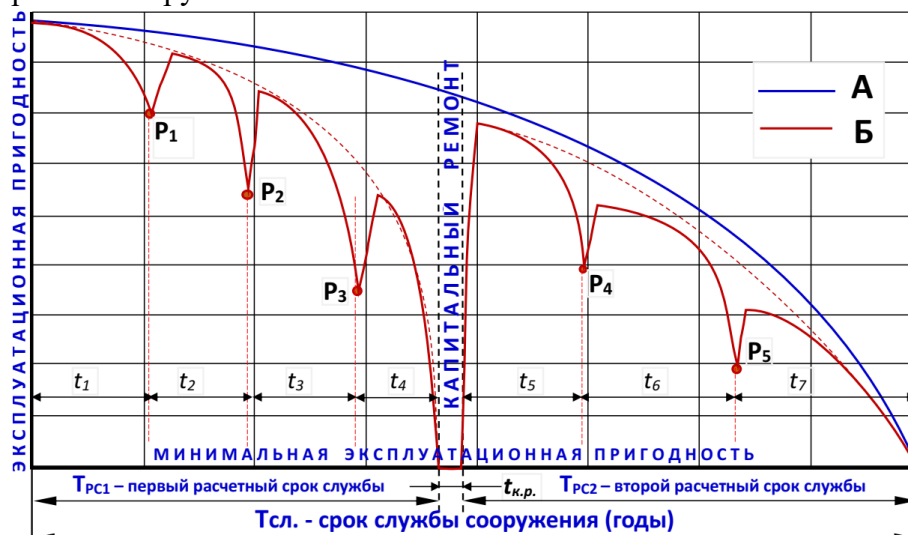


Рис. 2. Траектория ожидаемого (А) и фактического (Б) жизненного цикла конструкций МГТС

Fig. 2. Expected (A) and actual (B) life cycle of MGTs structures

Для поддержания проектной траектории снижения долговечности (кривая А) при быстром износе бетона может потребоваться проведение восстановительных ремонтов (моменты времени P_i на рис. 2), поддерживающих конструкцию в надлежащем техническом состоянии. Как для восстановительных работ, так и для капитального ремонта необходимы значительные вложения финансовых средств, поэтому для однозначного ответа на очевидный вопрос об источнике финансирования имеется традиционное и четкое определение такого источника – реновационные отчисления от приносимого эксплуатируемым объектом дохода. Как показал анализ [15], низкая экономическая эффективность функционирования дальневосточных портов второй половины прошлого века, например, не позволяла инвестировать средства на работы по восстановлению причального фронта, требующих от 20 до 40% первоначальной стоимости строительства. Эти расходы не покрывались платой субъектов предпринимательства, *арендующих причалы*, т.к. эти активы долгое время оставались объектами государственной собственности. Экономический фактор незаинтересованности арендаторов инвестировать в не принадлежащие им портовые активы собственные средства во многих случаях являлся определяющим, обусловившим *низкую долговечность сооружений* причального фронта многих портов.

Ситуация стала меняться с появлением Федерального закона 26 октября 2007 года № 261-ФЗ от «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1]. С введением этого закона, разрешающего предоставление земельных участков в границах портов, занятых гидротехническими сооружениями (МГТС), в собственность инвесторам, внимание к контролю и оценке технического состояния МГТС в стране на фоне их непрекращающегося износа увеличилось. Причина такого повышения внимания связана, прежде всего, с тем, что в указанном законе [1] официально введено понятие «владелец портового гидротехнического сооружения», в ст. 16 нормативно закреплена его обязанность «осуществлять эксплуатацию объектов инфраструктуры морского порта в соответствии с требованиями обеспечения промышленной безопасности ... и требованиями технических регламентов». С появлением в 2010 г. «Технического регламента о безопасности объектов морского транспорта»⁴ были нормативно закреплены достаточно конкретные требования к причалам как «объектам инфраструктуры морского транспорта», которые должны обладать прочностью и устойчивостью, позволяющими «выдерживать динамические и

⁴ Постановление Правительства РФ от 12 августа 2010 г. № 620 «Об утверждении технического регламента о безопасности объектов морского транспорта» (с изменениями на 7 октября 2019 года).

статические воздействия ветра, взволнованной водной поверхности, давление и инерционные нагрузки, исходящие от груза и изделий, ледовые нагрузки и влияние вибрации и тряски». Согласно введённому с 2016 года национальному ГОСТу⁵ в числе внешних воздействующих факторов оказывающих воздействие на характеристики элементов МГТС, обозначен «*коррозионно-активный агент морской воды*: вещество, находящееся в морской воде, приводящее к ускорению процессов разрушения» бетона и коррозии арматуры в нём. По данному ГОСТу этими веществами являются хлориды и сульфаты.

Также в числе обеспечивающих безопасность МГТС субъектов законодательно закреплена «*эксплуатирующая организация*»: «Предприятие или организация (юридическое лицо любой организационно-правовой формы) или физическое лицо, осуществляющее техническую эксплуатацию гидротехнического сооружения на праве собственности или ином законном основании»⁶. В обязанностях эксплуатирующей организации установлены *нормативные требования* о проведении на регулярной основе *обследований состояния* конструкций МГТС и *ведение мониторинга* их технического состояния. Утверждённые в нормативном порядке материалы обследований и заключения о техническом состоянии сооружения являются исходными данными для включения их в состав технических заданий на разработку проектов ремонтов объекта инфраструктуры морского транспорта, включая капитальный ремонт, которые должны выполняться по утверждённым проектам производства ремонтных работ объекта.

Одной из основных целей принятия технических регламентов [1, 17, 18] и их требований, закреплённых соответствующими нормами, является «предупреждение действий, вводящих в заблуждение приобретателей», что должно достигаться тем, что МГТС «... *должны удовлетворять требованиям безопасности в течение всего периода их эксплуатации при условии выполнения приобретателем этих объектов требований, установленных ... нормативными документами*»⁶. То есть МГТС не должны иметь физического износа, препятствующего нормальной эксплуатации. Достижение указанной цели подтверждается обязательным предоставлением эксплуатантом «Декларации о соответствии сооружения установленным требованиям ... с доказательственными материалами по результатам освидетельствования сооружения»⁷ от отраслевых экспертных организаций, которые выполняют технический контроль портовых ГТС с использованием строгой нормативной базы. Декларация «о соответствии ...» предоставляется органам *государственного контроля (надзора)*, которые, руководствуясь требованиями Федерального закона от 31.07.2020 г. № 247-ФЗ «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» [20], обязаны выполнять *оценку соответствия объектов* нормативным требованиям и останавливать эксплуатацию сооружения до устранения элементов несоответствия объекта требованиям норм.

Подтверждением этого является опыт строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений на побережье о. Сахалина в течение последних 40 лет [9]. При этом основой рекомендаций проектировщикам⁸ является сохранение составов бетона, а строителям – выполнения правил производства работ⁹ при бетонировании конструкций и проектных требований по прочностным и деформативным свойствам бетона и арматуры. Целью традиционного вероятностного подхода «назначения долговечности» бетона в конструкциях являются рекомендации по обеспечению её *живучести, т.е. «неразрушения»* конструкции, хотя при этом не приводится какой-либо *критерий*, определяющий возможный *срок её службы* [21].

⁵ ГОСТ Р 56257-2014 Характеристика факторов внешнего природного воздействия. Общая классификация.

⁶ ГОСТ Р 54523-2011 Портовые гидротехнические сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния (с Изменением № 1 2013 г.). М.: Стандартинформ, 2012.

⁷ СП 389.1326000.2018 Техническая эксплуатация объектов инфраструктуры морского порта.

⁸ СП 287.1325800.2016 Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства (с Изменением № 1 от 13 марта 2024 г.). М.: Минрегион России, 2016.

⁹ СНиП 3.07.02-87. Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения / Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1998. 68 с.

Из содержания всех рассмотренных материалов можно констатировать, что, несмотря на большой объём исследований, «нормируемый» в настоящее время *срок службы сооружения* (рис. 2А) до потери эксплуатационных показателей либо до необходимости проведения ремонта (рис. 2Б) является результатом применения вероятностного подхода, что не имеет научного описания протекания комплекса процессов в явлении деградации бетона. Пока нет утверждённой методики его расчёта, основанной на детерминистском подходе с интегральным *математическим описанием всех процессов деградации бетона*, что объясняет частые несоответствия между качественными показателями бетона (или его компонентами) и долговечностью. Учитывая приведённый анализ, вопрос о необходимости проектирования «по предельному состоянию 3-й группы» или «по параметрам долговечности», наряду с традиционным подходом или взамен его, сегодня является ключевым в обеспечении возможности адекватного конкретному искусственному сооружению из железобетона расчёта длительности его жизненного цикла [22]. Этот вопрос стоит наиболее остро на фоне участвовавших случаев внезапного (в течение 3–4 месяцев после ввода в эксплуатацию) разрушения конструкций МГТС, что особенно характерно для зоны переменного уровня воды в зимний период [14].

Следуя «классическим» путём к цели нормирования количественных параметров долговечности бетона защитного слоя ж/б элементов МГТС при эксплуатации в условиях действия агрессивной среды, необходимо разработать математическое описание процесса – модель деградации структуры бетона в защитном слое арматуры. Безусловно, создание современной расчётной модели долговечности бетонных поверхностей МГТС, контактирующих с агрессивной морской средой, прежде всего должно базироваться не только на *формализации всех накопленных результатов натурных обследований* технического состояния элементов конструкций причалов, но и на формализованных результатах всех исследовательских работ по данному направлению.

В то же время такая модель должна базироваться на детерминистском подходе к количественному описанию качественной картины всех стадий развития деградации бетона этого слоя от суммарного действия агрессивных факторов. В модели одновременного действия ряда факторов должен найти отражение результат действия каждого фактора, его вклада в общий – конечный результат комплексного процесса деструкции бетона. И для каждого фактора должна быть определена собственная модель описания процесса его воздействия на структуру бетона (аналитическая функция влияния) и критерий, достижение которого «реализует» результат этого частного процесса в виде «добавки» к суммарному *результату деструкции бетона* защитного слоя арматуры при действии нескольких факторов.

Следовательно, цель разработки деградационной модели бетона защитного слоя арматуры – реализация научно обоснованной *концепции его долговечности* – создание математического аппарата для описания деградации структуры бетона под действием процессов воздействия агрессивных факторов для прогноза длительности *сохранения исходной структуры бетона защитного слоя и её качественных свойств* по отношению к стальной арматуре.

Концепция и критерий долговечности бетона защитного слоя ж/б элементов конструкции морского сооружения в определении его срока службы

Под «работой» конструкции принято понимать её поведение на стадии эксплуатации как «выполнение» своих проектных функций без ограничений в условиях действия расчётных нагрузок без потери её жёсткости и устойчивости, в т.ч. с допустимыми местными повреждениями. Эксплуатационная пригодность конструкции есть *качественная характеристика её работоспособности*, являющаяся функцией времени, и с этой точки зрения она прямо связана с понятием долговечности. Потому что накопление внутренних и поверхностных повреждений конструкции, т.е. её деградация, представляет собой процесс постепенного снижения во времени характеристик её работоспособности до *конкретно измеряемого критического уровня*, когда эксплуатация конструкции по соображениям безопасности должна быть прекращена.

Поэтому в контексте данной работы *КОНЦЕПЦИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ* ж/б элемента конструкции МГТС рассматривается как поддержание *прочности и долговечности бетона защитного слоя* конструкционной арматуры элемента конструкции на протяжении всего срока службы сооружения. Это значит, что в бетоне защитного слоя должны выполняться условия сохранения *его структуры и её качественных свойств* как единого комплекса *главных функций* защитного слоя по отношению к стальной арматуре:

- защиты арматуры от механических повреждений при воздействии ударов, вибраций и других нагрузок, которые могут повлиять на целостность арматуры;
- обеспечения сцепления между арматурой и бетоном, предотвращения смещения арматуры внутри бетона и обеспечения равномерного распределения напряжений;
- обеспечения барьера между арматурой и внешней средой, снижающего проникновение влаги и агрессивных веществ к арматурным стержням для их защиты от коррозии;
- оказывания сопротивления разрушению от внутренних напряжений, возникающих от статических и динамических нагрузок на конструкцию.

Согласно Межгосударственному стандарту «Надёжность строительных конструкций и оснований» и приведённому выше перечню главных функций *защитного слоя* ж/б элемента конструкции МГТС, за его предельно допустимое состояние по долговечности *следует считать отказ по второму предельному состоянию*, выражающийся в виде коррозионного *отслоения защитного слоя* бетона с оголением арматуры ж/б элемента. *При накоплении таких отслоений* «возникает необходимость ограничения во времени эксплуатации сооружения из-за ...неприемлемого снижения эксплуатационных качеств или расчётного срока службы сооружения (например, коррозионные повреждения)» ... «до указанных параметров его дальнейшая эксплуатация недопустима, затруднена или нецелесообразна»³. Принятое решение о предельном состоянии элементов конструкций МГТС, в соответствии с требованиями «Технического регламента о безопасности объектов морского транспорта»⁴ должно быть *количественно* установлено в задании на проектирование как *КРИТЕРИЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ* для оценки работоспособности *защитного слоя бетона*.

Важно отметить, что на данный момент модели, используемые для прогнозирования коррозионных повреждений железобетона, могут быть действительны только для одного из возможных критических повреждений, приведённых выше [13, 21–24]. Предлагаемый здесь критерий долговечности есть показатель результата действия комплекса деградационных процессов в защитном слое бетона, и поэтому он является оптимальным *индикатором критического состояния* работоспособности ж/б элемента, обладающим следующими характеристиками:

- лёгкостью визуального определения и возможностью количественной оценки;
- показывающий им уровень повреждения не представляет угрозу для безопасности жизни и здоровья людей;
- «критериальное повреждение» может быть относительно легко отремонтировано с точки зрения восстановления как целостности конструкции, так и требований к её долговечности.

Эксплуатируемое с даты постройки или реконструкции МГТС, согласно п. 231 Регламента⁴, при обнаружении по данным регулярного обследования его ж/б элементов их физического износа более 30% относительно проектных параметров (здесь, например, *n% поверхности отслоения бетона и оголения арматуры ж/б опор в зоне переменного уровня, ригелей, балок и плит эстакады и лицевой стенки верхнего строения причала*) эксплуатирующей организацией принимается решение о выведении сооружения из эксплуатации, проведении капитального ремонта, реконструкции или утилизации сооружения. Дата принятия такого управляющего решения и определяет «РАСЧЁТНЫЙ СРОК СЛУЖБЫ СООРУЖЕНИЯ» (рис. 2Б).

В настоящее время есть необходимость и возможность в рамках принятой концепции и критерия деградации ж/б элементов МГТС обобщить теоретические и экспериментальные исследования проблемы долговечности ж/б элементов МГТС с целью формирования адекватной

природе процессов имитационной модели для прогноза срока их службы. Принимая детерминистический подход к решению поставленной задачи прогноза долговечности (срока службы) ж/б элемента, следует использовать полностью определённые данные о **параметрах факторов и процессах их действия** на свойства бетона и арматуры.

Факторы и процессы деградации защитного слоя бетона при инициации и развитии явления коррозии арматуры

Результатами большого числа теоретических разработок, лабораторных и натурных исследований установлены причинно-следственные связи явления деградации защитного слоя бетона от арматуры в железобетонных элементах как от действия внешних факторов агрессивной среды на изменения структуры бетона и его свойств на протяжении определённого отрезка времени, так и от внутренних факторов, отражающих состав ингредиентов бетона и их свойства.

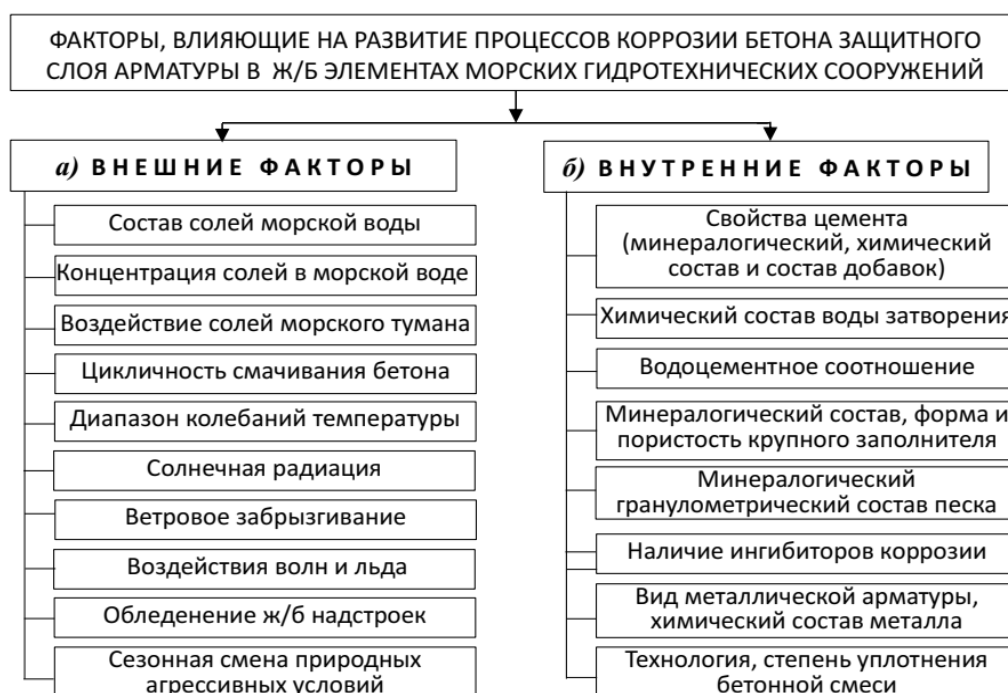


Рис. 3. Внешние (а) и внутренние (б) факторы, определяющие долговечность бетона МГТС

Fig. 3. External (a) and internal (b) factors the durability of MGTS concrete determining

К *внешним факторам*, определяющим интенсивность коррозионных процессов в ж/б элементах МГТС, относят [2–9, 14, 19, 21–24]: солевой состав морской воды, концентрацию ионов солей, температуру воды и воздуха, режим смачивания поверхностей ж/б элемента конструкции, механическое действие волн и льда, ветровой напор, морской туман, действие солнечной радиации, обледенение верхнего строения конструкций МГТС и др. (рис. 3а).

К *внутренним факторам* (рис. 3б), определяющим сопротивление поверхностных слоёв бетона воздействию внешней агрессивной среды, относят его состав и диффузионные характеристики (что также установлено многими исследованиями [2–9, 14, 19, 21–24]), на которые самым существенным образом влияют: вид, химический и минеральный состав вяжущего в бетоне; состав добавок; химические составы заполнителей; плотность бетона; структурная пористость и степень её водонасыщения; вид арматуры и др. Кроме того, большое значение имеет технология приготовления, укладки, уплотнения смеси и ухода за бетоном в процессе его твердения, включая пропаривание и полив.

Согласно принятой выше концепции долговечности бетона защитного слоя арматуры, основной характеристикой возникающего предельно допустимого состояния отказа следует

считать отказ по второму предельному состоянию, выражающийся в виде отслоения бетона защитного слоя и оголения арматуры на некотором участке поверхности ж/б элемента. Как показывает практика, необратимые проявления деструкции ж/б элементов конструкций МГТС при непрерывном воздействии на их поверхности агрессивной морской среды и условий эксплуатации проявляются в результате одновременных развивающихся процессов как прямого механического снижения толщины защитного слоя от истирания, ударов, отколов и пр., так и в результате химической (*атмосферно-солевая морская коррозия*), физической (*морозное разрушение*) и физико-химической коррозии (доступ солей к арматуре через трещины).

При исследовании коррозии бетона принято анализировать развитие двух основных процессов (рис. 4): диффузионный перенос агрессивных веществ в его структуре, отражающий глубину коррозионных повреждений; химические реакции реакционноспособных компонентов цементного камня с агрессивными веществами.



Рис. 4. Схема механизмов химической коррозии арматуры в железобетоне

Fig. 4. Mechanism of chemical corrosion of reinforcement in reinforced concrete

В настоящее время в литературе исследователи выделяют два основных, превалирующих среди других химических процесса, приводящих к тому, что деструкция железобетона достигает критической стадии, это: *карбонизация* и *хлоридизация* [5, 13, 23]. Процессы этого типа показывают, каким образом и насколько произошло изменение деформативно-прочностных свойств бетона по глубине. Но большинство из них, в силу сложностей учёта степени влияния фактора, имеют ряд недостатков. В частности, описание транспортных механизмов агрессивной субстанции носит общий, поверхностный характер, не учитывается связывающая способность конкретного вида бетона, возраст конструкции, результат накопленного влияния внешних факторов среды эксплуатации (мороза) и напряжённое состояние конструкции на скорость коррозионного процесса.

Карбонизация происходит из-за проникновения атмосферного CO_2 , который реагирует с водой в порах с образованием углекислоты. Учитывая постоянную щёлочность поровой влаги в цементном камне бетона, способствующей сохранению химически пассивного состояния поверхности стали, её коррозия в бетоне – относительно медленный процесс. Фронт карбонизации продвигается сквозь бетон, пока не достигнет стали, и пассивирующий слой бетона вокруг арматуры разрушается, когда pH падает до 8,0.

Хлоридизация в структуре бетона защитного слоя арматуры нарастает, когда pH здесь падает ниже 11,0. Для бетона с незначительным количеством хлоридов, изначально содержащихся в бетонной смеси, постепенное его накопление до количества, инициирующего процесс коррозии арматуры, происходит преимущественно за счёт диффузии (движения ионов под воздействием градиента концентрации). **Скорость проникновения хлоридов** зависит от качества бетона и окружающей среды. В случае тонкого защитного слоя бетона невысокого качества, в условиях попеременного его смачивания и высыхания, а также в прибрежных и морских условиях хлориды могут быстро достигать арматуры. Инкубационный период этого процесса определяется предельным содержанием хлорид-ионов (0,1–0,4% от массы цемента). И уже при наличии хлоридов в бетоне, как правило, развивается питтинговая коррозия поверхности арматуры, в присутствии O_2 и H_2O процесс коррозии арматуры активизируется.

Деструкционные нарушения структуры бетона при проникании атмосферного углекислого газа, химически активных элементов морской воды начинаются с поверхностного слоя бетона, контактирующего с водой, и постепенно распространяется вглубь поверхности защитного слоя. В условиях морской среды процессы диффузии углекислого газа и ионов хлора из морской воды протекают одновременно (рис. 4). *Важное значение* для кинетики коррозионных повреждений имеет знак и уровень действующих в бетоне напряжений. Так, при сжатии бетона до уровня напряжений, соответствующих началу структурного микротрещинообразования, проницаемость бетона для агрессивной среды снижается до минимума. При растяжении проницаемость бетона для агрессивной среды возрастает при любых уровнях напряжений. Первичная деструкция структуры этого конгломерата обычно рассматривается как нарушение структуры его матрицы – цементного камня.

Но следует отметить, что в мире больше внимание уделяется исследованию химической коррозии арматуры в бетоне и в меньшей степени – его долговечности при физической коррозии, которая проявляется при попеременном увлажнении и высыхании, а также при попеременном замораживании и оттаивании объектов. Изучено и установлено, что важнейшим процессом деструкции структуры бетона в элементах конструкций МГТС является дополнительное водонасыщение и увеличение растягивающих напряжений в структуре вследствие **замерзания поровой воды**, что объясняет отсутствие корреляции между существующими методами испытаний и эксплуатационными характеристиками конструкций [12, 13].

Поскольку цементный бетон относится к капиллярно-пористым коллоидным материалам, в которых проникающая жидкая среда имеет различные формы связи, и в первом, и во втором случаях структура бетона разрушается от действия влаги в виде образующихся в её порах и капиллярах солей или льда. Вода в больших порах бетона замерзает в первую очередь, а незамёрзшая вода в мелких порах/капиллярах образует поток, который создаёт гидравлическое давление, приводящее к трещинообразованию [13]. При эксплуатации МГТС *в реальных условиях такие факторы среды, как влага (вода) и температура, могут воздействовать на ж/б элементы в опасных сочетаниях их длительности и интенсивности.*

Также установлено [2–6, 9, 12], что в бетоне защитного слоя элементов конструкций МГТС в условиях циклического смачивания и высыхания быстрее происходят процессы **карбонизации и депассивации арматуры**. Объёмы разрушений защитного слоя бетона от воздействия негативных факторов, включая высокое содержание гигроскопических морских солей в воздухе, самым существенным образом зависят от высотных отметок расположения конструкций относительно спокойного уровня моря, также как и от их ориентации по сторо-

нам света и относительно берега. В зоне попеременного смачивания или ветрового забрызгивания процессы диффузии ионов хлорида в защитный слой бетона идут намного быстрее, чем карбонизация, и поэтому здесь он разрушается быстрее. При этом в порах и трещинах бетона могут накапливаться кристаллы соли, что также приводит к его ускоренному разрушению.

Известные на данный момент базовые функции влияния различных физических, химических, механических факторов на нарастание деструкции бетона приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Факторы и функции их влияния на процессы деструкции защитного слоя [25, 26]

Factors and their influence functions to the processes of the concrete protective layer destruction [25, 26]

Факторы	Функции влияния	Примечания
Влажность (φ)	$f_{cl}(\varphi) = (1 + \frac{(1-\varphi)^4}{(1-\varphi_c)^4})^{-1};$ $f_w(\varphi) = a_0 + \frac{1 - a_0}{1 + (\frac{1 - \varphi}{1 - \varphi_c})^s}$	φ – относительная влажность пор; φ_c – критический уровень влажности ($\approx 0,75$); t_0 – время определения коэффициента диффузии; t_e – эквивалентный период гидратации; $\lambda_{ca}, \lambda_{fa}$ – коэффициенты для крупных и мелких заполнителей; v_{ca}, v_{fa} – объёмные соотношения крупных и мелких заполнителей;
Возраст бетона (n)	$f_{cl}(n) = (\frac{t_0}{t})^m; \quad f_w(n) = 0,3 + \sqrt{\frac{13}{t_e}};$	$\lambda_{ca}, \lambda_{fa}$ – коэффициенты для крупных и мелких заполнителей; v_{ca}, v_{fa} – объёмные соотношения крупных и мелких заполнителей;
Карбонизация (R)	$f_{cl}(R) = \frac{1 - \lambda_{ca} v_{ca} f_p \phi}{1 - \lambda_{fa} v_{fa} \phi \vartheta + \mu};$ $f_w(R) = 1 - \zeta R;$	f_p, ϕ – функции поровой перколяции и пористость бетона после карбонизации; ϑ – насыщенность пор; μ – линеаризованный коэфф-т сорбции;
Температура (T)	$f_{cl}(T) = f_w(T) = e^{\frac{E}{G}(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T})}$	E – энергия активации; T_{ref} – исходная температура начального коэффициента диффузии;
Содержание свободных хлоридов (C_f)	$f_{cl}(C_f) = 1 - k(C_f)^p$	G – газовая константа; R – степень карбонизации;
Напряжённое состояние конструкции (σ)	$f_{cl}(\sigma) = (1 + A_{c(t)} \times (\frac{\sigma_{c(t)}}{f_{c(t)}}))^2$	$\sigma_{c(t)}$ – номинальное значение напряжения при сжатии (растяжении); $f_{c(t)}$ – предельное значение напряжения при сжатии (растяжении);
Водоцементное отношение ($ВЦ$)	$f_{cl}(W) = \exp k_{ВЦ} (\frac{1}{ВЦ_0} - \frac{1}{ВЦ})$	$a_0, s, m, k, p, \zeta, A_{c(t)}, k_{ВЦ}$ – коэффициенты, определяемые экспериментально

Логико-математическое описание концепции детерминистического подхода к оценке долговечности ж/б элементов конструкций МГТС

Бетон — *многофазная пористая самоорганизующаяся открытая диссипативная система*, которая в «исходном состоянии» до монтажа в конструкцию находится в **равновесном состоянии** с водой в порах бетона. Через поверхности ж/б элементов при их установке в конструкцию в агрессивной среде морской воды и при действии знакопеременных температур происходит доступ агрессивных факторов внешней среды к компонентам структуры бетона. Это приводит к механическим и химическим изменениям в структуре бетона, что вызывает нарушение внутреннего равновесия в системе «бетон». Различные *деструкционные процессы* в бетоне, ослабляющие связи материальных компонентов и внутренние прочностные связи в них, *переводят бетон в неравновесное, коррозионно-деструктурированное состояние*, далёкое от точки термодинамического равновесия с окружающей средой, т.к. оно связано с уровнем действующих напряжений и характеризуется развитым коррозионным повреждением.

Следуя обозначенной выше цели, все известные теоретические и эмпирические зависимости – модели проявления действия каждого из *агрессивных факторов* с соответствующими результатами их действия в виде деструкции структуры бетона, от даты погружения ж/б элемента конструкции в агрессивную среду и до момента *разрушения бетона защитного слоя арматуры*, ввиду неодновременности начал и окончаний периодов их действия, необходимо «расположить на шкале времени развития деструкции бетона защитного слоя», подобно схеме на рис. 4. Время, которое затрачивается на «параллельное с карбонизацией» проникновение хлоридов через защитный слой бетона и *инициализацию коррозии* арматуры, обычно обозначается в исследованиях как *инкубационный период* и его стремятся связать с прогнозированием срока службы конструкций.

Но вследствие того, что бетон, благодаря высокой щёлочности, является идеальным материалом для защиты стальной арматуры, коррозия стали в бетоне – медленный процесс, занимающий относительно длительное время, даже в случае суровых условий воздействия. Поэтому срок службы ж/б элементов в агрессивной среде целесообразно моделировать состоящим из отдельных временных фаз (рис. 5), ограниченных «*промежуточными критическими (предельными) состояниями*» и бетона, и арматуры в зоне защитного слоя, характеризующимися соответствующими им «индикаторами» повреждений [16]. Данный подход был впервые использован Tuutti [27], предложившим концептуальную модель, разделяющую срок службы железобетонной конструкции на две отдельные стадии: *инициирования и распространения коррозии арматуры*, которая рассматривалась также рядом других авторов [12, 23, 28].

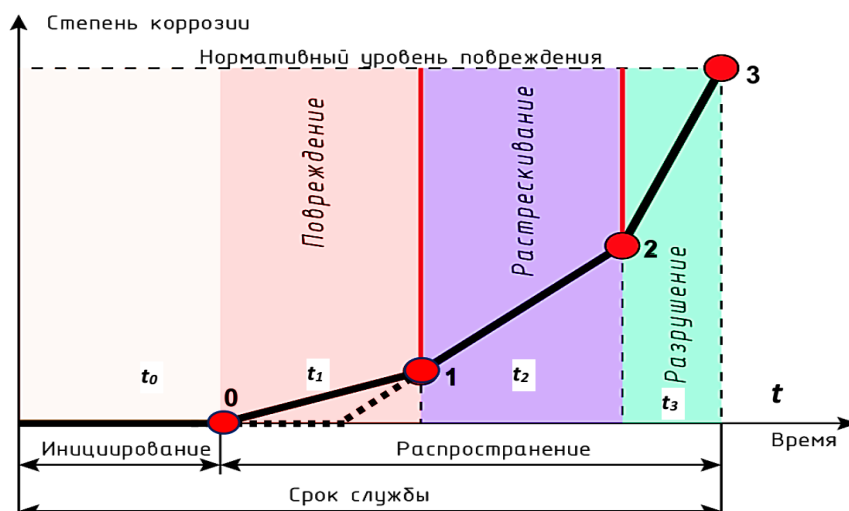


Рис. 5. Интегральная модель срока службы ж/б элемента конструкции МГТС

Fig. 5. Conceptual service life model of reinforced concrete structure

На рис. 5 с позиций детерминированного подхода к анализу процесса разрушения бетона защитного слоя арматуры представлена диаграмма в виде четырёх связанных причинно-следственными связями последовательных этапов и, соответственно, четыре характерных интервала времени. При этом стадию распространения коррозии, в соответствии с этапами развития физических нарушений структуры бетона, можно разделить на три фазы:

- фаза «*Повреждение*» характеризуется временем t_1 развития уже протекающего процесса разрушения пассивирующего слоя арматуры и распространения, наполнения продуктами её коррозии, прилегающей к разделу «сталь–бетон» зоны, с частичной их реакцией с компонентами бетона без оказания давления на окружающий бетон. Переход от первой фазы распространения коррозии ко второй (точка 1) можно определить как момент времени начала трещинообразования в структуре бетона на мезоуровне;

- фаза «*Растрескивание*» характеризуется временем t_2 коррозии арматуры, не защищённой пассивирующим слоем, и развитием интенсивного трещинообразования с достижением отдельными трещинами поверхности железобетонного элемента и их раскрытием до

определённой величины; конец фазы растрескивания (*точка 2*) – время, при котором ширина раскрытия трещины от действия расширяющихся продуктов коррозии арматуры достигает определённого (критического) значения. Этот этап считается наиболее важным из-за видимой ширины трещины на поверхности бетона, т.к. её контроль стал нормой в попытке минимизировать влияние трещин на разрушение, вызванное коррозией;

– фаза «Разрушение» характеризуется временем t_3 интенсивной коррозии арматуры до предельного уровня, характеризуемого слиянием трещин в макротрещины (*точка 3*), сопровождающееся отторжением слоя бетона защитного слоя с обнажением арматурных стержней.

В рамках принятой концепции данного исследования, с учётом декомпозиции процесса деградации железобетонного элемента конструкции МГТС, как это представлено на идеализированной диаграмме на рис. 5, расчётное время срока службы ж/б элемента T_{PC} является суммой означенных интервалов времени:

$$T = t_0 + t_1 + t_2 + t_3 . \quad (1)$$

Безусловно, такое модельное представление реального комплексного процесса деградации бетона будет давать достаточно упрощённый, идеализированный результат, лишь опосредованно характеризующий натурный стохастический процесс разрушения бетона защитного слоя. Практика показывает, что при высокой плотности бетона, надлежащей толщине защитного слоя и отсутствии его повреждений (трещины, сколы, каверны и пр.) арматура в бетоне сохраняется в химически пассивном состоянии (*этап t_0*), без явных коррозионных повреждений долгие годы и десятилетия [5, 6, 7]. Но последующее появление первых трещин, их рост (*этапы t_1 – t_2*) облегчают доступ агрессивной среды к поверхности арматуры, способствуют возникновению и развитию её коррозии [16, 23, 25, 26, 29, 30].

Из-за сложности физико-химических процессов и их стохастического взаимодействия в настоящее время нет общепринятой методологии оценки **предельной деструкции бетона** защитного слоя ж/б элементов конструкций МГТС, которая делает модель Tuutti основой, обеспечивающей «стыковку» математических моделей, описывающих «частные» процессы на всех этапах жизненного цикла ж/б элемента, эксплуатируемого в морских условиях. Но тем не менее разработанные с использованием **метода деградационных функций**, позволяющего учитывать механические, тепловые и химические энергетические воздействия на структуру бетона, «упрощённые математические модели долговечности могут служить рациональной основой проектирования» [21, с. 15].

К настоящему моменту разработаны и верифицированы данными лабораторных и натурных экспериментов ряд «частных» моделей расчёта времени карбонизации до полной деактивации поверхности арматуры (t_0), а также времени начала трещинообразования и достижения хлоридами поверхности арматуры и её первичных и развитых коррозионных повреждений (t_1 – t_2). Этим исследованиям посвящены работы многих авторов [16, 23, 25, 26, 29, 30], предложивших модели, описывающие скорости деградации защитного слоя бетона с использованием общих законов аналитической теории диффузии А. Фика.

Суть метода деградационных функций заключается в том, что интегральный деградационный эффект складывается из частных результатов воздействия отдельных агрессивных факторов на компоненты структуры бетона, действие которых считается независимым. Деградационные функции для каждого конкретного случая получают из анализа «работы» деградационных моделей – математических выражений, описывающих изменение напряжённого состояния бетона конструкции во времени, например, растягивающих напряжений в бетоне в опасном сечении балки. Процесс карбонизации обычно описывается одномерным дифференциальным уравнением первого закона Фика, описание диффузионного транспорта хлоридов основано на втором законе Фика. Оба закона представляют собой дифференциальные уравнения *скорости нарастания концентрации агрессивного вещества* на фронте его продвижения в структуре бетона в частных производных.

Эффективные коэффициенты *диффузии CO_2 , хлоридов и влаги* в структуре бетона определяются на основе начальных коэффициентов диффузии, рассчитанных при эталонных усло-

виях окружающей среды, путём их умножения на *функции влияния* модификационных факторов (табл. 1). При этом, как правило, априори принимается, что скорость продвижения фронта диффузии агрессивного фактора (CO_2 или ионов Cl^-) в структуре бетона с учётом его влажности является достоверной оценкой показателя скорости продвижения *фронта деградации* структуры бетона. Решения соответствующих нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных при определённых начальных условиях позволяют определить продолжительность стадий деградации структуры бетона защитного слоя (рис. 5): стадии инициирования (t_1), а также стадий раскрытия первичных трещин растяжения на поверхности ж/б элемента (t_2) и времени начала активной коррозии арматуры (t_3).

В реальных условиях эксплуатации прогнозируемые и наблюдаемые параметры трещинообразования могут существенно отличаться, в результате чего было высказано предположение, что характеристики трещин являются ненадёжными индикаторами коррозионного процесса, проверка которого продемонстрировала отсутствие какой-либо корреляции между шириной трещины и скоростью коррозии. Одним из возможных объяснений является то, что ширина поверхностной трещины сама по себе не может надёжно описать состояние границы раздела сталь–бетон. С другой стороны, для целей проведения ремонтных работ локальное/глобальное разрушение конструкции не может быть принято в качестве предельного состояния в основном из-за соображений безопасности человека. Таким образом, в качестве заключительного отрезка комплексного процесса деструкции защитного слоя бетона элементов МГТС *следует рассматривать его отслаивание* (с полным либо частичным оголением арматурных стержней), приводящее к возможности прямого контакта арматуры с морской средой и прогрессирующему разрушению железобетонной конструкции. Пример описания процесса отслоения бетона защитного слоя показан ниже.

Концептуальные модели явления отслаивания бетона защитного слоя для формирования его имитационной численной модели

Как известно, трещина растяжения в бетоне на внешней стороне поверхности ж/б элемента зарождается при условии, что растягивающие напряжения в бетоне от объёмного расширения продуктов коррозии арматурного стержня достигнут предела его прочности на растяжение. Объём образованных продуктов коррозии – гидроксидов $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (ржавчины) по разным оценкам превышает объём исходного металла, подвергшегося коррозии, в 2–6 раз [2, 4, 23]. Сложное напряжённое состояние в массиве бетона защитного слоя, созданное давлением продуктов коррозии стали арматурного стержня, предотвращает свободные перемещения их границы «в глубь» массива ж/б элемента.

Учитывая, что в реальных конструкциях под защитой слоя бетона расположен ряд параллельных арматурных стержней, суммарное давление от расширения продуктов коррозии стали соседних стержней формирует условия отслаивания бетона защитного слоя. С учётом суперпозиции одновременного давления продуктов коррозии отдельных стержней на бетон защитного слоя, этот процесс приводит к появлению отторжения бетона защитного слоя по общей поверхности разрушения, параллельной внешней грани ж/б элемента. Учитывая нелинейное деформирование бетона под нагрузкой, ключевым является вопрос о том, как именно моделировать процесс зарождения и развития явления отторжения защитного слоя бетона.

Концепция равномерного распределения продуктов коррозии стали (рис. 6б) [11]. Первые модели формирования межфазной переходной зоны между поверхностью арматурного стержня и бетона, ввиду отсутствия методик и инструментов количественных оценок геометрии и размеров этой зоны, основывались на концепции равномерного распределения слоя продуктов коррозии стали вокруг стержня (рис. 6а) [11, 23, 29]. Поэтому существующие теоретические исследования описываемого здесь явления в большинстве своём опираются на аналитическую модель толстостенного цилиндра, имитирующую этот процесс равномерным увеличением его внутреннего диаметра [26, 28, 29, 31] под действием давления, порождаемого расширением продуктов коррозии стали арматурного стержня. В условиях плоской деформации бетонный цилиндр должен растрескаться при выполнении условия:

$$\sigma_{min} \cdot (D + 2d) = f_t \cdot 2c, \quad (2)$$

где σ_{min} – минимальное растягивающее напряжение, требуемое для начала развития трещины; D – диаметр арматуры, м; d – толщина слоя продуктов коррозии, м; f_t – прочность бетона на растяжение, МПа; c – величина защитного слоя, м.

В представленной на рисунке 6б схеме модели суммарное давление от *равномерного расширения* продуктов коррозионного разрушения стали стержней арматуры реализуется в развитии давления на физическую поверхность бетона, пограничную с поверхностью арматуры. Здесь деформации развиваются преимущественно в сторону наименьшего сопротивления, т.е. давление на условную «обратную» поверхность защитного слоя бетона вызывает развитие трещин растяжения и «выдавливание» некоторого объёма бетона из его массива. А с противоположной стороны стержней арматуры бетон находится в условиях всестороннего сжатия и не разрушается. В то же время в ряде работ предлагались модели, основанные на предположении о «пористой» зоне конечной толщины вокруг межфазной среды «сталь–бетон». В ряде работ, в частности, в работе [30] авторы считали, что продукты коррозии должны сначала заполнить эту зону, прежде чем их расширение начнёт создавать давление на окружающий бетон. В этой работе разработана *аналитическая модель* возникновения трещин в толстостенном бетонном цилиндре с учётом пористой зоны на границе раздела «сталь–бетон» и определено соотношение между процентной потерей массы стали и внутренним радиальным давлением, вызванным коррозией. Но, как было установлено многими исследованиями [28, 29, 32, 33], такой подход, основанный на предположении о «пористой» зоне конечной толщины вокруг арматурного стержня, приводит к физически некорректным результатам.

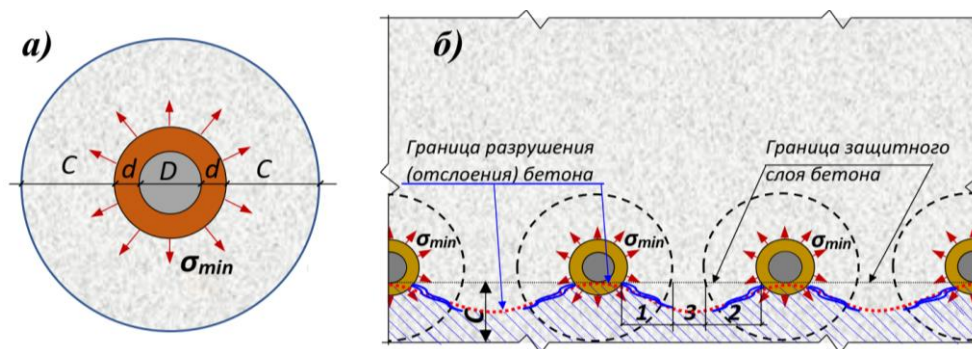


Рис. 6. Формирование отторжения бетона защитного слоя арматуры при её коррозии, по [11]

Fig. 6. Formation the rejection's concrete of protective layer of reinforcement by its corrosion, on [11]

Концепция неравномерного распределения продуктов коррозии стали. Современными инструментальными исследованиями было установлено, что предположение о *равномерном распределении продуктов коррозии* арматуры по её окружности не соответствует реальной ситуации. В исследованиях [33, 35], например, для случая ускоренной коррозии арматуры в условиях искусственного климата с использованием технологии сканирования с помощью электронной микроскопии и электронного зонда было показано, что в процессе коррозии её продукты проникают в пористую зону на границе раздела «сталь–бетон» не только в начале процесса коррозии, пока они полностью не заполняют «пористую» зону конечной толщины, но и могут диффундировать в бетон постоянно с течением времени. Постепенно эта зона превращается в слой, состоящий из бетона и продуктов коррозии стали, и давление на окружающий бетон начинает оказываться после заполнения контактной зоны.

Ряд исследователей отмечают, что суммарный объём продуктов коррозии «примерно в три-четыре раза превышает объём прокорродировавшего объёма металла прутков». При этом авторы работы [33], например, показали, что из-за ограничений, налагаемых окружающим бетоном, «глубина коррозии стали распределена по Гауссу под углом к стальному стержню» [33, с. 2264] (рис. 7а), а продукты коррозии распределяются таким образом, что толщина их слоя обратно пропорциональна кратчайшему расстоянию до поверхности защитного слоя бетона.

То есть, наибольшая толщина продуктов коррозии D_{max} располагается ближе к поверхности защитного слоя и полукольцом влево и вправо вглубь бетона вокруг стержня арматуры [32]. А с другой стороны стержня слой коррозии равномерен и мал настолько, что не учитывается в дальнейших расчётах, поскольку, соотношение между значениями максимального u_1 и минимального u_2 радиальных смещений продуктов разрушения, согласно [34, с. 6], находится в пределах 1/30. В полярной системе координат, установленной в центре тяжести арматуры (рис. 7б), степень коррозии поверхности арматуры характеризуется потерей её радиуса со стороны свободной поверхности ж/б элемента D_θ , что может быть описано следующим образом:

$$D_\theta = R - \frac{(R - D_m) \cdot R}{\sqrt{(R + D_m)^2 \cdot \cos^2 \theta + R^2 \cdot \sin^2 \theta}}, \quad (3)$$

где: D_θ – потеря радиуса стержня арматуры (объёма стали) при полярном угле θ ; R – исходный радиус стержня; D_m – максимальная глубина его коррозии (потеря радиуса). Из соотношения (3) можно получить уравнение «поверхности объёма продуктов коррозии арматуры» в процессе коррозии следующим образом, имея в виду описание явления в плоской задаче:

$$D_s(\theta) = \left\{ \frac{(R + D_{max}) \cdot R}{\sqrt{(R + D_{max})^2 \cdot \cos^2 \theta + D^2 \cdot \sin^2 \theta}} - R \right\}, \quad (4)$$

где: $D_s(\theta)$ – толщина слоя продуктов коррозии в точке с углом θ , а D_{max} – это максимальная толщина слоя продуктов коррозии.

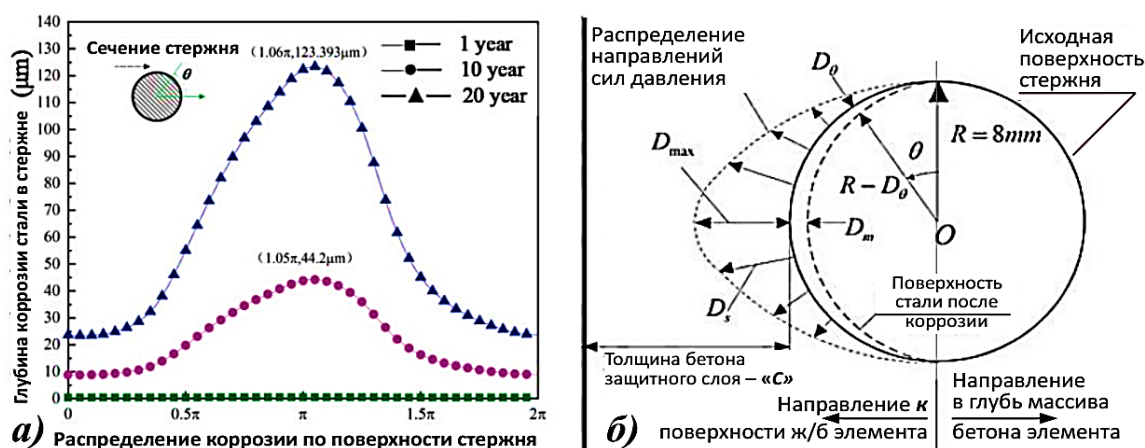


Рис. 7. Эллиптическая модель неравномерного коррозионного расширения арматуры, по [33]

Fig. 7. Elliptical model of non-uniform corrosion expansion of reinforcement, on [33]

В конце начального периода коррозии под действием силы расширения ржавчины в бетоне, окружающей арматуру, когда продукты коррозии заполнят зазор между арматурой и бетоном, создаётся поле радиальных перемещений, и окружающий арматуру бетон будет сжиматься создаваемым давлением, что приведёт к росту напряжений расширения в бетоне защитного слоя.

Примеры реализации имитационных численных моделей срока службы ж/б элементов МГТС по критерию долговечности отслоения бетона защитного слоя

Моделирование коррозионного процесса до фазы отслоения бетона от арматуры с использованием МКЭ. Растрескивание бетона защитного слоя арматуры, вызванное коррозией стали под воздействием хлоридов, в работе [28] было смоделировано в двумерной постановке задачи о плоской деформации идеализированной модели бетонного цилиндра. Диффузия хлоридов в зависимости от температуры проводилась с использованием алгоритма массовой диффузии по закону Фика в ABAQUS FEM solver. Также с использованием алгоритма ABAQUS XFEM с 8-узловыми конечными элементами были смоделированы процессы, связанные с разрушением

структуры бетона: от диффузии хлоридов до коррозии стали и растрескивание бетона защитного слоя. Для определения диффузии хлоридов использовался закон Фика, а потеря массы в результате коррозии стали была получена с использованием закона Фарадея. Давление продуктов коррозии стали на границе раздела бетон–сталь моделировалось путём воздействия на поверхность бетона в виде радиально направленных перемещений с равномерной эпюрой по окружности.

Разрушение бетона в работе описывается моделью развитием Хиллерборгской когезионной трещины, которая образуется при передаче напряжения с одной поверхности на другую и определяет ослабление напряжения в направлении, нормальном к трещине. Функция размягчения (разрыва связей структуры бетона) определяется пределом прочности при растяжении f_t (Мпа) и энергией разрушения G_F (Дж/м²). Критерием прочности принято значение энергии разрушения в конечном элементе, определяющем зарождение трещины и его разделение ею.

Вертикальные трещины зарождаются в бетоне и распространяются вертикально с увеличением длины и ширины. Наряду с основными вертикальными трещинами вдоль границы бетон–сталь появляются и другие «размытые» трещины (наклонённые под углом 45° или 90°), но их длина значительно уступает основным. Эти трещины могут распространяться и соединяться в пространстве между стальными стержнями и образовывать слой отторжения бетона защитного слоя арматуры, если стальные стержни расположены близко друг к другу и имеют толстое бетонное покрытие (рис. 8А).

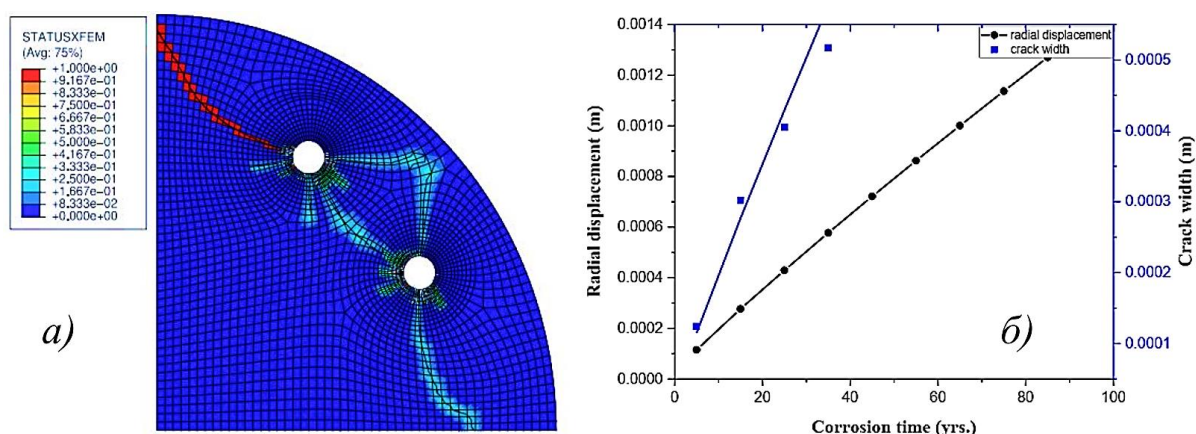


Рис. 8. КЭ моделирование распространения коррозии (фаза «Разрушение») [28]

Fig. 8. FE modeling of corrosion propagation ("Destruction" phase) [28]

При таком расслоении бетонный элемент становится неустойчивым, происходит быстрый сброс накопленных расширяющих напряжений в бетоне. Энергия разрушения полностью израсходована, и напряжение теперь передаётся на продукты коррозии, находящиеся между трещинами. На рис. 8Б показано изменение ширины трещины и радиального смещения в бетонном покрове от времени воздействия в хлоридных средах.

Моделирование коррозионного процесса до фазы «разрушение» с использованием метода разрушения фазового поля. При численном моделировании явлений коррозионного разрушения бетона защитного слоя в виде отслоения его от арматуры и массива ж/б элемента в результате расширения продуктов коррозии арматуры авторы работы [33], например, рассматривали такую задачу на образцах бетона с одиночными стержнями и с рядом стержней в условиях плоской деформации и с граничным условием неподвижности кромок образца. Для испытаний взяты образцы из бетона с квадратным/прямоугольным поперечным сечением с одной стороной – 100 мм и второй – 100/270 мм. Диаметр стальной арматуры – 16 мм, а толщина защитного слоя бетона («с») – переменна. В примерах взяты параметры обычного тяжёлого бетона, рассматриваемого как однородный материал.

Численное решение задач коррозионного растрескивания образцов в рассматриваемой работе реализуется *методом разрушения фазового поля* в конечно-элементном пакете Abaqus, позволяющим *избежать необходимости в сетке пользовательских элементов*. В отличие от других подходов к описанию движущихся поверхностей, метод фазового поля основан на концепции термодинамики Гриффита и объединяет описание процессов накопления повреждений и разрушения материала в единую структурную модель, основанную на принципе локального минимума суммы энергий упругости и разрушения. В рамках этого метода рост трещины по любой траектории может быть предсказан без каких-либо дополнительных критериев, что обусловлено глобальной минимальностью и преобразованием накопленной энергии в энергию разрушения. Поэтому этот метод подходит для прогнозирования сложных явлений разрушения, включая зарождение, распространение, разветвление и слияние трещин в деформируемых твёрдых телах.

Решение в [33] осуществлено путём воздействия на границу «сталь–бетон» с *овальным очертанием* эпюры нагружения поверхности бетона в виде радиально направленных деформаций с максимумом $D_{\max}$ в центре давления. Приращение деформаций (нагрузки) на каждом шаге составляло $1,2 \times 10^{-4}$ мм. Этот метод позволяет «запоминать» результаты вычислений предыдущего шага (временного отрезка), в т.ч. *прогноза направления образования трещин*, и использовать их для следующих итераций вычислений. На Рис. 9 приведены графические иллюстрации результатов расчётов развития трещин в бетоне защитного слоя при различных значениях его толщины, но при одинаковом значении давления продуктов коррозии арматуры, создаваемого смещением их границы при расширении до $D_{\max} = 35.4 \times 10^{-3}$ мм.

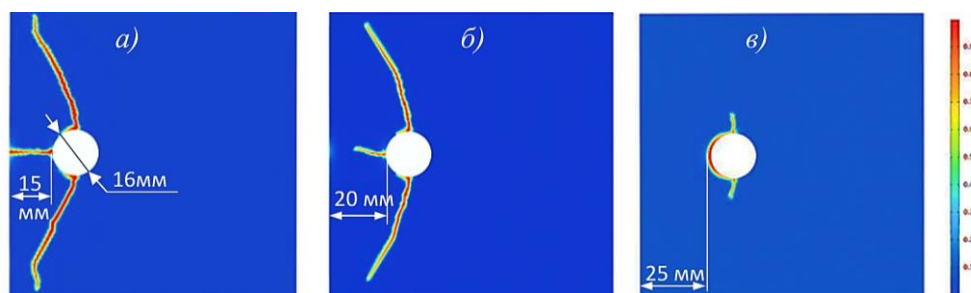


Рис. 9. Рост коррозионных трещин в бетоне для разной толщины защитного слоя, по [33]

Fig. 9. The corrosion cracks growth in reinforced concrete if the protective layer thickness increasing, on [33]

Полученные из экспериментов изображения трещин наглядно демонстрируют, что с увеличением толщины защитного слоя бетона длина трещин растяжения в области стержня арматуры значительно уменьшается при том же уровне нагрузки, а при большей толщине защитного слоя угол между трещинами и внешней поверхностью защитного слоя постепенно уменьшается, что подтверждает выводы Базанта [29].

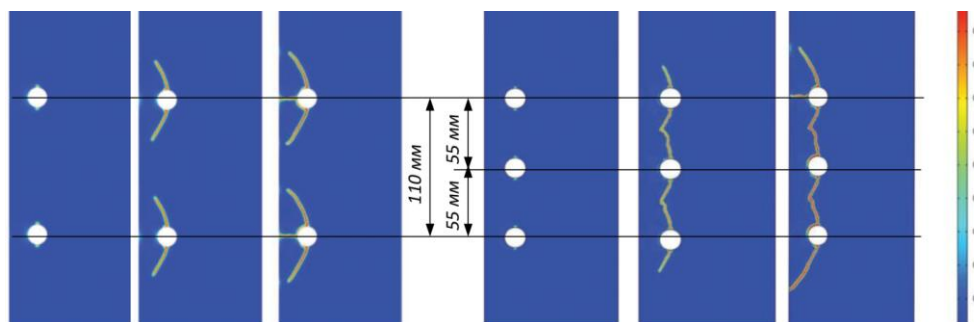


Рис. 10. Развитие зоны отслоения защитного слоя бетона при разном шаге арматуры, по [33]

Fig. 10. Development of the peeling zone of the concrete protective layer with different reinforcement pitches, on [33]

На рис. 10 показаны закономерности растрескивания бетона защитного слоя небольшой, но одинаковой толщины в случае рядного армирования для трёх уровней достижения давления – нагрузки от расширения продуктов коррозии арматуры D_{max} : а), з) $\leq 6,0 \cdot 10^{-3}$ мм; б), д) $\leq 18,0 \cdot 10^{-3}$ мм; в), е) $\leq 35,4 \cdot 10^{-3}$ мм. В случае двух стальных стержней с большим расстоянием между ними защитный слой разрушается отдельными выколами. Аналогичное исследование образца другого типа с небольшим расстоянием между армирующими элементами демонстрирует взаимовлияние распространения соседних трещин, когда они соединяются, формируя общую поверхность консолидированной трещины, т.е. происходит отслаивание бетона и оголение нескольких рядов арматуры. Результаты моделирования наглядно демонстрируют применимость метода фазового поля разрушения для моделирования коррозионного отторжения бетона защитного слоя арматуры и её оголения.

Обсуждение необходимости разработки нормативной методологии информационного моделирования срока службы ж/б элементов МГТС по долговечности бетона защитного слоя арматуры

Ранее в статье на основе ретроспективного анализа результатов объёмных исследований состояния ж/б элементов конструкций МГТС тихоокеанских российских портов были представлены примеры недостаточной эффективности комплекса нормативных требований прежних периодов в части нормирования их срока службы на базе теории вероятностей, где учитывается стохастическая природа основных воздействующих факторов агрессивной морской среды. Но используемые в нормах уравнения предельных состояний не содержат переменной времени и обеспечивают мгновенную надёжность и долговечность в момент возведения или строительства конструкции, а последующие происходящие изменения не учитываются. Это отмечается всеми исследователями, включая зарубежных, констатирующих, например: «оценка качества бетона с точки зрения долговечности должна рассматриваться как действительно основанная на эксплуатационных характеристиках», «Предварительной квалификации и лабораторных испытаний смесей недостаточно, что означает, что многие из так называемых "эксплуатационных характеристик" на данном этапе являются лишь частичными» [19, с. 237]. Поэтому проблема отсутствия расчётной методологии прогнозирования срока службы ж/б элементов МГТС, в перспективе растущей востребованности морских перевозок в Дальневосточном регионе и по Северному морскому пути, делает *актуальной целью повышения надёжности* МГТС не только в силу их высокой стоимости, но и как объектов, от исправного состояния которых зависит безопасность в разных её аспектах для людей, сооружений, субъектов бизнеса, регионов и страны в целом.

С учётом этого в настоящее время обновлена и частично доработана российская база нормативно-правового обоснования мер проектного обеспечения методологии директивного назначения срока службы сооружения. Но этого недостаточно, произошедший директивный переход к управлению «жизненным циклом сооружений» однозначно показал необходимость разработки адекватной реалиям природной среды методологии проектного прогнозирования долговечности ж/б конструкций МГТС. При этом, несмотря на колоссальные объёмы выполненных на данный момент разнообразных исследований, в частности многостадийности явления коррозии на основе процессов карбонизации и хлоридизации бетона – с целью выработки единой нормативной методологии расчёта его долговечности в агрессивной среде, такой методологии пока нет и научное описание протекания комплекса процессов в явлении деградации бетона отсутствует. В то же время универсальность законов диффузии, описывающих процессы коррозии бетона, обуславливает возможность использования имитационного моделирования при прогнозировании долговечности бетона при воздействии различных агрессивных сред.

Основной причиной существующего положения дел в этой области, что показано в соответствующих разделах статьи, является высокая *сложность многофакторного явления коррозии стали* в массиве бетона как многофазного гетерогенного пористого материала, подвергающегося комплексному постоянному и периодическому воздействию ряда агрессивных факторов

морской среды. В то же время ряд исследований показывает, что, с учётом характера поровой структуры бетона, наличия и параметров микротрещин, решение задачи возможно путём построения иерархической имитационной модели и её решение численными технологиями МКЭ. Эти примеры говорят о том, что для безаварийной эксплуатации и продления ресурса сооружений *нужны новые научные подходы* к прогнозу технического состояния ж/б элементов МГТС на всех стадиях их жизненного цикла. *Нужны алгоритмы*, построенные на реальных количественных критериях уровня надёжности и прогноза долговечности ж/б элементов.

Таким образом, для перехода к прогнозированию срока службы МГТС по параметрам долговечности необходима «самодостаточная» содержательно-формальная *методология (комплекс моделей и методов)*, базирующаяся на детерминистском подходе к количественному описанию качественной картины всех стадий развития деградации бетона защитного слоя от суммарного действия агрессивных факторов. Практическое применение методологического подхода, основанного на характеристиках бетона и параметрах среды, для расчётной оценки и кодификации срока службы требует следующих элементов: а) критерия предельного состояния; б) заданного срока службы сооружения; в) математической модели деградации бетона; г) перечня тестов на соответствие требованиям; д) жёсткого определения процедур технического обслуживания и стратегий ремонтов и е) системы контроля качества. Критерии предельного состояния долговечности бетона должны быть определены количественно, с чёткими физическими значениями, например процент растрескивания или отслоение поверхности и пр.

В методологии комплексного действия ряда факторов должен найти отражение результат их одновременно-последовательного действия, вклада каждого в общий – конечный результат комплексного процесса деструкции структуры порового пространства бетона с учётом химической активности элементов цементной матрицы. И для каждого агрессивного фактора должна быть определена собственная модель описания процесса его воздействия на структуру бетона (аналитическая функция влияния) и результата этого частного процесса в виде «добавки» к суммарному *результату деструкции бетона* защитного слоя арматуры при действии нескольких факторов, критерием которого может рассматриваться, например, факт *отторжения защитного слоя бетона*.

В заключение следует отметить, что целью разработки имитационной деградационной модели долговечности бетона защитного слоя арматуры должно быть логико-математическое описание научно обоснованной *концепции его долговечности* под воздействием комплекса агрессивных факторов для прогноза длительности сохранения *исходной структуры бетона* защитного слоя и её *качественных свойств* по отношению к стальной арматуре. При этом следует переходить к описанию неравномерности толщины слоя продуктов коррозии с учётом их «размытой» границы контактной зоны овального очертания в структуре бетона. Имеющиеся примеры получения решений задач в этой области методом численного моделирования с применением МКЭ показывают наиболее вероятный путь к разработке нормативной методологии имитационного моделирования срока службы ж/б элементов, работающих в агрессивной среде, *по параметрам долговечности или «по предельному состоянию 3-й группы»*, наряду с традиционным подходом или взамен его.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.Г. Цуприк – выявление проблематики рассматриваемой предметной области, постановка целей и задач исследования, разработка логико-повествовательного плана статьи; К.И. Патлай – сбор и системный анализ литературных источников, обобщение существующих теоретических положений и концепций, формализация накопленных данных экспериментальных исследований, написание и оформление текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

V.G. Tsuprik – identification of the problems of the subject area under consideration, setting the goals and objectives of the study, development of the logical-narrative plan of the article; K.I. Patlay – collection and systemic analysis of literary sources, generalization of existing theoretical provisions and concepts, formalization of accumulated data from experimental studies, writing and design of the text of the article. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральный закон от 08.11.2007 № 261-ФЗ «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 4 августа 2023 года) (редакция, действующая с 1 сентября 2024 года).
2. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты: монография. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
3. Ступаченко П.П., Холошин Е.П., Антропова В.А. Долговечность гидротехнических железобетонных сооружений на побережье Дальнего Востока. Владивосток: Примор. совет НТО, Ком. по пробл. долговечности бетона и железобетона, 1987. 78 с.
4. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П.М. Стойкость бетона в суровых климатических условиях. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
5. Цуприк В.Г. Прочность и долговечность бетона и железобетона морских гидротехнических сооружений в условиях Дальнего Востока: монография. Владивосток: Дальнаука, 1994. 327 с.
6. Ким Л.В. Обследование гидросооружений: учебное электронное издание: учебное пособие для вузов; Мин-во образования и науки Российской Федерации, Дальневосточный федеральный ун-т, Инженерная шк. Владивосток: ДВФУ, 2014. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
7. Вавренюк С.В., Ефименко Ю.В., Вавренюк В.Г., Фарафонов А.Э. Результаты исследования причин разрушения бетонного покрытия морского пирса на побережье Японского моря // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 37–41.
8. Свиридов В.Н., Малюк В.Д. Оценка долговечности бетона в конструкциях морских сооружений по опыту строительства на Дальнем Востоке // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Труды II Международной конференции. М., 2014. Т. III. С. 388–398.
9. Малюк В.В. Прогнозирование долговечности конструкций морских гидротехнических сооружений из бетона по опыту строительства и эксплуатации в суровых климатических условиях // Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы VIII Национальной конференции с международным участием, Саратов, 15–16 ноября 2018 года / Под редакцией Ф.К. Абдразакова. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2018. С. 223–231.
10. Малюк В.В., Малюк В.Д., Вавренюк С.В., Леонович С.Н. Метод оценки долговечности бетона морских сооружений на этапе строительства // Строительные материалы. 2023. № 10. С. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-25-28>
11. Патлай К.И., Цуприк В.Г. Роль защитного слоя бетона в обеспечении коррозионной стойкости железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 2 (55). С. 86–101.
12. Малюк В.В. Концепция долговечности бетона для прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 4(45). С. 105–115.
13. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В. Долговечность морских сооружений при комбинированной коррозии железобетона // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. № 1(5). С. 65–72.
14. Малюк В.В., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Конструкционный бетон морских гидротехнических сооружений: деградационный и внезапный отказ // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 05–06 апреля 2018 г. / под. ред. А.А. Бакатовича, Л.М. Парфеновой. Новополоцк: ПГУ, 2018. С. 70–76.
15. Фисенко А.И. и др. Морские порты Дальнего Востока: изменение экономических интересов и отношений собственности // Транспортное дело России. 2016. № 3. С. 100–102.
16. Меншиков В.Л., Цикало В.А. Нормативная база по техническому контролю портовых ГТС в условиях «регуляторной гильотины» // ГИДРОТЕХНИКА. 2021. № 1(62). С. 16–21. URL: <https://www.hydroteh.ru/>.
17. Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (ред. от 21.11.2022).

18. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (с изменениями на 25 декабря 2023 года).
19. Alexander M.G. Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation // Revista ALCONPAT. 2018. № 8(3). P. 224–245.
20. Федеральный закон от 31.07.2020 г. № 247-ФЗ «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» (с изменениями на 26 декабря 2024 года).
21. Степанова В.Ф., Фаликман В.Р., Королева Е.Н. Мониторинг и анализ нормативных документов в области проектирования железобетонных конструкций по их жизненному циклу // Строительные материалы. 2018. № 7. С. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-761-7-14-19>
22. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–102.
23. Леонович С.Н., Степанова А.В., Цуприк В.Г., Ким Л.В., Гуринович В.Ю. Долговечность бетона при хлоридной агрессии: монография / Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2020. – 1 CD. [90 с.]. – Систем. требования: Acrobat Reader, Foxit Reader либо любой другой их аналог. – ISBN 978-5-7444-4673-4. – Текст: электронный
24. Степанова В.Ф., Фаликман В.Р. и др. Методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учётом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл. Методическое пособие. М.: Минстрой РФ, 2019. 128 с.
25. Карапетов Э.С., Шестовицкий Д.А. Прогнозирование срока службы железобетонных мостов с учетом внешних факторов и особенностей бетона защитного слоя // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. № 2 С. 17–29.
26. Тамразян А.Г., Минеев М.С. Калибровка модели коррозионного растрескивания защитного слоя бетона // Безопасность зданий и сооружений. 2021. № 2(94). С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-94-2-56-62>
27. Tuutti K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concr. Res. Inst, 1982. 469 p.
28. Olawale A. Numerical analysis of concrete degradation due to chloride-induced steel corrosion // Advances in Concrete Construction. 2019. Vol. 7. № 4. P. 203–210.
29. Bazant Z.P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-application // J Struct Div. 1979. № 105(6). P. 1155–1166.
30. Троян В.В. Имитационное моделирование долговечности бетона // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2. Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/46976> (дата обращения: 05.03.2025).
31. Chernin L., Val D., Volokh K. Analytical modelling of concrete cover cracking caused by corrosion of reinforcement // Materials and Structures. 2010. № 43. P. 543–556.
32. Li K., Zhang Y., Wang S., & Zeng J. Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application // Materials and Structures. 2018. Vol. 51. № 164. [Электронный ресурс].
33. Xia X., Qin C., Lu G., Gu X. and Zhang Q. Simulation of corrosion-induced cracking of reinforced concrete based on fract phase field method // CMES. 2024. Vol. 138. № 3. P. 2257–2276.
34. Lu S., Wen B., Niu D., Luo D. Concrete protective layer cracking caused by non-uniform corrosion of reinforcements // Materials. 2019. Vol. 12. № 4245. [Электронный ресурс].

REFERENCES

1. Federal Law of 08.11.2007 No. 261 “On Seaports in the Russian Federation and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation” (as amended on August 4, 2023) (version effective September 1, 2024). (In Russ.).
2. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods of Their Protection: monograph. Moscow, Stroyizdat, 1980. 536 p. (In Russ.).
3. Stupachenko P.P., Kholoshin E.P., Antropova V.A. Durability of Hydraulic Reinforced Concrete Structures on the Coast of the Far East. Vladivostok, Primorsky Council of Scientific and Technical Association, Committee on the Problem of Durability of Concrete and Reinforced Concrete, 1987. 78 p. (In Russ.).
4. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Schissl P.M. Durability of concrete in harsh climatic conditions. Moscow, Stroyizdat, 1990. 320 p. (In Russ.).

5. Tsuprik V.G. Strength and durability of concrete and reinforced concrete of marine hydraulic structures in the Far East: monograph. Vladivostok, Dalnauka, 1994. 327 p. (In Russ.).
6. Kim L.V. Inspection of hydraulic structures: educational electronic publication: textbook for universities; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Far Eastern Federal University, Engineering School. Vladivostok, FEPU, 2014. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (In Russ.).
7. Vavrenyuk S.V., Efimenko Yu.V., Vavrenyuk V.G., Farafonov A.E. Results of the study of the causes of destruction of the concrete coating of the sea pier on the coast of the Sea of Japan. *Construction Materials*, 2019, no. 11, pp. 37–41. (In Russ.).
8. Sviridov V.N., Malyuk V.D. Assessment of the durability of concrete in the structures of offshore structures based on construction experience in the Far East. *Concrete and Reinforced Concrete – a Look into the Future: Proceedings of the II International Conference*. Moscow, 2014, vol. III, pp. 388–398. (In Russ.).
9. Malyuk V.V. Forecasting the durability of marine hydraulic structures made of concrete based on the experience of construction and operation in harsh climatic conditions. *Problems and Prospects for the Development of Construction, Heat, Gas and Energy Supply: Proceedings of the VIII National Conference with International Participation*, Saratov, November 15–16, 2018. Edited by F.K. Abdrazakov. Saratov, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, 2018, pp. 223–231. (In Russ.).
10. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Vavrenyuk S.V., Leonovich S.N. Method for assessing the durability of concrete of marine structures at the construction stage. *Construction Materials*, 2023, no. 10, pp. 25–28. (In Russ.).
11. Patlay K.I., Tsuprik V.G. The role of the protective layer of concrete in ensuring corrosion resistance of reinforced concrete structures of offshore hydraulic structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2023, no. 2 (55), pp. 86–101. (In Russ.).
12. Malyuk V.V. The concept of concrete durability for predicting the service life of structures under frost exposure. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2020, no. 4 (45), pp. 105–115. (In Russ.).
13. Shaly E.E., Leonovich S.N., Kim L.V. Durability of offshore structures under combined corrosion of reinforced concrete. *Bulletin of the Volga State Technological University, Series "Materials. Designs. Technologies"*, 2018, no. 1(5), pp. 65–72. (In Russ.).
14. Malyuk V.V., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Structural concrete of offshore hydraulic structures: degradation and sudden failure. *Architectural and Construction Complex: Problems, Prospects, Innovations. Collection of articles from the international scientific conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University*, Novopolotsk, April 5–6, 2018. Ed. by A.A. Bakatovich, L.M. Parfenova. Novopolotsk, PSU, 2018, pp. 70–76. (In Russ.).
15. Fisenko A.I. and others. Seaports of the Far East: changes in economic interests and ownership relations. *Transport Business of Russia*, 2016, no. 3, pp. 100–102. (In Russ.).
16. Menshikov V.L., Tsikalo V.A. Regulatory framework for technical control of port GTS under the conditions of the "regulatory guillotine". *HYDROTECHNICS*, 2021, no. 1(62), pp. 16–21. (In Russ.).
17. Federal Law of 27.12.2002 No. 184 "On technical regulation" (as amended on 21.11.2022). (In Russ.).
18. Federal Law of 30.12.2009 No. 384 "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" (as amended on December 25, 2023). (In Russ.).
19. Alexander M.G. Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation. *Revista ALCONPAT*, 2018, no. 8(3), pp. 224–245. (In Russ.).
20. Federal Law of 31.07.2020 No. 247 "On Mandatory Requirements in the Russian Federation" (as amended on December 26, 2024). (In Russ.).
21. Stepanova V.F., Falikman V.R., Koroleva E.N. Monitoring and analysis of regulatory documents in the field of design of reinforced concrete structures according to their life cycle. *Construction Materials*, 2018, no. 7, pp. 14–19. (In Russ.).
22. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures. *Academia, Architecture and Construction*, 2015, no. 1, pp. 93–102. (In Russ.).
23. Leonovich S.N., Stepanova A.V., Tsuprik V.G., Kim L.V., Gurinovich V.Yu. Durability of concrete under chloride aggression: monograph. FEPU Engineering School. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2020. 1 CD. [90 p.]. Text: electronic. (In Russ.).
24. Stepanova V.F., Falikman V.R. et al. Methodological manual for assigning the service life of concrete and reinforced concrete structures, taking into account the impact of the operating environment on

- their life cycle. Methodological manual. Moscow, Ministry of Construction of the Russian Federation, 2019, 128 p. (In Russ.).
25. Karapetyan E.S., Shestovitsky D.A. Forecasting the service life of reinforced concrete bridges taking into account external factors and features of the concrete protective layer. *Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering*, 2014, no. 2, pp. 17–29. (In Russ.).
 26. Tamrazyan A.G., Mineev M.S. Calibration of the model of stress-corrosion cracking of the concrete protective layer. *Safety of Buildings and Structures*, 2021, no. 2(94), pp. 56–62. (In Russ.).
 27. Tuutti K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm, Swedish Cement and Concr. Res. Inst, 1982. 469 p. (In Russ.).
 28. Olawale A. Numerical analysis of concrete degradation due to chloride-induced steel corrosion. *Advances in Concrete Construction*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 203–210.
 29. Bazant Z.P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-application. *J Struct Div.*, 1979, no. 105(6), pp. 1155–1166.
 30. Troyan V.V. Simulation modeling of concrete durability. *Modern Scientific Research and Innovation*, 2015, no. 2, part 1 [Electronic resource]. (In Russ.).
 31. Chernin L., Val D., Volokh K. Analytical modeling of concrete cover cracking caused by corrosion of reinforcement. *Materials and Structures*, 2010, no. 43, pp. 543–556.
 32. Li K., Zhang Y., Wang S., & Zeng J. Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application. *Materials and Structures*, 2018, vol. 51, no. 164. [Electronic resource].
 33. Xia X., Qin C., Lu G., Gu X. and Zhang Q. Simulation of corrosion-induced cracking of reinforced concrete based on fract phase field method. *CMES*, 2024, vol. 138, no. 3, pp. 2257–2276.
 34. Lu S., Wen B., Niu D., Luo D. Concrete protective layer cracking caused by non-uniform corrosion of reinforcements. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 4245. [Electronic resource].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Патлай Кирилл Игоревич – аспирант Департамента морских арктических технологий Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ patlai.ki@dvfu.ru

Kirill I. Patlay, Postgraduate Student of the Department of Marine Arctic Technologies of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Цуприк Владимир Григорьевич – доктор технических наук, доцент, профессор Департамента морских арктических технологий Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ tsuprik.vg@dvfu.ru

Vladimir G. Tsuprik, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Arctic Marine Technologies of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 16.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 13.05.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

Научная статья

УДК 691

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/143-156>

Проектирование состава гидротехнического бетона с учётом его жизненного цикла

Елена Николаевна Пипко^{1,✉}, Роман Сергеевич Федюк^{1,2}, Егор Евгеньевич Помников¹,
Любовь Петровна Нагрузова³, Ольга Алексеевна Тюрикова¹,
Рустам Габтилфаритович Рамазанов⁴, Чжан Сюань⁴

¹ Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация

² Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский
и технологический институт по строительству,
Владивосток, Российская Федерация

³ Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова,
Абакан, Российская Федерация

⁴ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Белгород, Российская Федерация

✉ pipko.en@dvfu.ru

Аннотация. Жизненный цикл объекта капитального строительства рассматривается как интегрированная замкнутая система, позволяющая решить такие проблемы строительной отрасли, как перерасходы времени и средств, ограничения производительности и нехватка рабочей силы. Особую сложность вызывает комплексное проектирование состава материала для специальных сооружений с учётом его жизненного цикла. Для проведения экспериментальных исследований по подбору оптимального состава бетона были использованы следующие сырьевые материалы: цемент сульфатостойкий марки ЦЕМ I 42,5 CC, щебень фракций 5–10 мм и 10–20 мм, песок, вода, суперпластификаторы Sika Plast-2500 LFC и Sika ViscoCrete 5-600-SK, воздухововлекающая добавка SikaControl-95 Aer, нанокремнезём. Рассчитаны бетоны для разных типов гидротехнических сооружений (платформы гравитационного типа и сухого дока), используя разные комбинации подбора по каждому из классов бетона (применение бетона одного, двух, трёх и более классов). Несмотря на экономическую выгоду в данном применении трёх классов бетона, выбор бетона классов В40 и В45 является более выгодным, оптимально-технологическим вариантом, так как уровень качества сооружения при данном подборе выше. При этом повышение эффективности бетонов возникает при замыкании их жизненного цикла – повторном использовании бетонного лома.

Возможными способами улучшения свойств бетона с применением вторичных заполнителей является применение термовлажностного отверждения, использование пуццолановых материалов и т.д. Для снижения негативного влияния на прочность композита необходимо определять химические примеси в применяемых материалах на основе бетонного лома.

Ключевые слова: состав бетона, гидротехнический бетон, жизненный цикл

Для цитирования: Пипко Е.Н., Федюк Р.С., Помников Е.Е., Нагрузова Л.П., Тюрикова О.А., Рамазанов Р.Г., Чжан Сюань. Проектирование состава гидротехнического бетона с учётом его жизненного цикла // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 143–156.

Original article

Design of the composition of hydraulic concrete taking into account its life cycle

Elena N. Pipko^{1,✉}, Roman S. Fedyuk^{1,2}, Egor E. Pomnikov¹, Lyubov P. Nagruzova³,
Olga A. Tyurikova¹, Rustam G. Ramazanov⁴, Zhang Xuan⁴

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² Far Eastern Research, Design and Technological Institute for Construction, Vladivostok, Russian Federation

³ Khakass State University named after N.F. Katanov, Abakan, Russian Federation

⁴ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

✉ pipko.en@dvfu.ru

Abstract. The life cycle of a capital construction project is considered as an integrated closed system that helps solve such construction industry problems as time and cost overruns, productivity limitations, and labor shortages. Of particular complexity is the integrated design of the material composition for special structures taking into account its life cycle. The following raw materials were used to conduct experimental studies to select the optimal concrete composition: sulfate-resistant cement grade CEM I 42.5 CC, crushed stone of fractions 5–10 mm and 10–20 mm, sand, water, superplasticizers Sika Plast-2500 LFC and Sika ViscoCrete 5-600-SK, air-entraining additive SikaControl-95 Aer, nanosilica. Concretes for different types of hydraulic structures (gravity-type platforms and dry docks) are calculated using different combinations of selection for each of the concrete classes (use of concrete of one, two, three or more classes). Despite the economic benefit in this application of three concrete classes, the choice of concrete classes C40 and C45 is a more advantageous optimal-technological option, since the quality level of the structure with this selection is higher. At the same time, the efficiency of concrete increases when closing their life cycle such reusing concrete scrap.

Possible ways to improve the properties of concrete using secondary fillers are the use of thermal and moisture curing, the use of pozzolanic materials, etc. To reduce the negative impact on the strength of the composite, it is necessary to determine the chemical impurities in the materials used based on concrete scrap.

Keywords: concrete composition, hydraulic concrete, life cycle

For citation: Pipko E.N., Fedyuk R.S., Pomnikov E.E., Nagruzova L.P., Tyurikova O.A., Ramazanov R.G., Zhang Xuan. Design of the composition of hydraulic concrete taking into account its life cycle. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 143–156. (In Russ.).

Введение

Строительная отрасль сталкивается со многими проблемами, включая перерасходы времени и средств, ограничения производительности и нехватку рабочей силы [1–2]. По сравнению с другими секторами она отстаёт в цифровизации на каждом этапе проекта [3–4]. Искусственный интеллект и машинное обучение появились как преобразующие технологии, революционизирующие строительный сектор [5–6]. Жизненный цикл объекта капитального строительства рассматривается как интегрированная замкнутая система (рис. 1) [7–8]. При этом рассматриваются все сферы жизнедеятельности населения, в том числе экологическая устойчивость, связанная с взаимовлиянием человека и окружающей среды [9–10].

Особую сложность вызывает комплексное проектирование состава материала для специальных сооружений с учётом его жизненного цикла. Бетон гидротехнических сооружений (ГТС) сталкивается с рядом специфических проблем, связанных с воздействием морской среды, таких как:

1. Коррозия арматуры, образование трещин в бетоне:

– солевые растворы: морская вода содержит высокую концентрацию хлора, который вызывает коррозию стальной арматуры, используемой в бетоне. Это приводит к снижению прочности и долговечности конструкции [11];

– проникновение влаги: влага проникает в бетон, что ведёт к коррозии арматуры и образованию трещин [12].

2. Механические повреждения:

– волновое воздействие: сильные волны и штормы вызывают механические повреждения бетона, такие как эрозия и разрушение [13];

– ударные нагрузки: морские сооружения подвергаются ударным нагрузкам от судов или других объектов, что также приводит к повреждениям [14];

– ледовое воздействие: повторяющиеся циклы замораживания и оттаивания значительно сокращают срок службы бетонных конструкций, которые эксплуатируются в условиях сурового климата [15].

3. Устойчивость к биологическим воздействиям:

– биопоражение: морская среда способствует росту водорослей, мхов и других организмов на поверхности бетона, что ухудшает его характеристики [16];

– образование моллюсков: накопление моллюсков и других организмов увеличивает вес конструкции и вызывает дополнительные нагрузки [17].

4. Воздействие химических веществ:

– сульфатная коррозия: сульфаты, содержащиеся в морской воде, реагируют с компонентами бетона, вызывая его разрушение [18];

– проблемы со щелочными реакциями: взаимодействие щелочных компонентов бетона с определёнными минералами приводит к образованию гелей, которые увеличивают объём и вызывают трещины [19].

5. Долговечность и уход:

– необходимость регулярного обслуживания: морские сооружения требуют более частого мониторинга и ремонта по сравнению с аналогичными конструкциями на суше [20];

– высокие затраты на обслуживание: из-за специфики условий эксплуатации затраты на обслуживание и ремонт могут быть значительно выше [21].

6. Экологические факторы:

– изменение уровня моря: изменение уровня моря из-за климатических изменений влияет на устойчивость морских сооружений [22];

– загрязнение: загрязнённые воды ускоряют коррозионные процессы и ухудшают качество бетона [23].



Рис. 1. Управление жизненным циклом объектов строительства

Fig. 1. Lifecycle management of construction projects

Эти проблемы требуют тщательного проектирования, выбора материалов и технологий для обеспечения долговечности и надёжности морских сооружений [24].

К основным требованиям к гидротехническому бетону, эксплуатируемому в условиях влияния морской среды Дальнего Востока и Арктики, можно отнести:

- прочность класса В45 и выше [25];
- водонепроницаемость W16–W20 [26];
- морозостойкость от F₂₀₀ и выше [27];
- плотность 1800–2500 кг/м³ (тяжёлый бетон) или 500–1800 кг/м³ (лёгкий бетон) [28].

Достичь данных характеристик, используя стандартные цементы, крайне сложно; необходимо применять композиционные вяжущие, в том числе и с использованием кремнезёмсодержащих и алюмосиликатных отходов различных производств [29–30].

Таким образом, на гидротехнические сооружения действует целый комплекс нагрузок и воздействий. Использование специальных добавок в бетон, защитных покрытий и регулярный мониторинг состояния конструкций способствуют минимизации негативных воздействий морской среды на ГТС. Однако вопросы проектирования состава гидротехнического бетона с учётом его жизненного цикла остаются недостаточно изученными.

Материалы

Для проведения экспериментальных исследований по подбору оптимального состава бетона были использованы следующие сырьевые материалы:

1. Цемент сульфатостойкий марки ЦЕМ I 42,5 СС производства ОАО «Спасскцемент». Соответствует требованиям ГОСТ 31108 и ГОСТ Р 57293-2016. Данный вид цемента характеризуется высокой устойчивостью к агрессивному воздействию сульфатов, что делает его подходящим для эксплуатации в условиях повышенной влажности и агрессивной среды.

2. Щебень фракций 5–10 мм и 10–20 мм, соответствующий ГОСТ 8267-93. Щебень обладает высокой прочностью и морозостойкостью. Сочетание двух видов фракций щебня в соотношении 70/30 обеспечивает необходимую прочность бетона и устойчивость бетонной смеси благодаря высокому коэффициенту сцепления с цементом и плотной упаковке частиц.

3. Песок по ГОСТ 8736-2014 – это природный мелкодисперсный материал, который служит заполнителем и способствует улучшению удобоукладываемости бетонной смеси.

4. Для приготовления бетонной смеси использовалась вода, соответствующая требованиям 23732-2011.

5. Для повышения характеристик бетонной смеси применялись следующие химические добавки:

- суперпластификатор Sika Plast-2500 LFC – высокоэффективная пластифицирующая добавка, предназначенная для повышения подвижности и удобоукладываемости бетонной смеси без снижения прочности конечного продукта;
- суперпластификатор Sika Visco-Creete 5-600-SK – пластифицирующая добавка нового поколения, обеспечивающая высокую текучесть бетонной смеси при сохранении прочностных характеристик. Позволяет существенно снизить водоцементное соотношение;
- воздухововлекающая добавка SikaControl-95 Aer – используется для введения мелких воздушных пор в структуру бетона, повышая его устойчивость к циклам замораживания-оттаивания и увеличивая долговечность конструкции.

Нанокремнезём, полученный из гидротермальных вод Камчатских вулканов, – ультрадисперсный наполнитель, улучшающий микроструктуру бетона, способствующий повышению плотности и уменьшению проницаемости материала. Применение нанокремнезёма позволяет увеличить прочность бетона на сжатие и растяжение.

Выбранный набор исходных материалов обеспечивает возможность достижения высоких эксплуатационных свойств бетона, необходимых для конкретных условий эксплуатации.

Методы

Для расчёта экономической эффективности подбора оптимального состава бетона следует выполнить несколько задач, в которых требуется:

1. Провести зонирование сооружения по классам среды эксплуатации.
2. Установить требования к составу бетона.
3. Определить объём бетонов в каждом классе среды эксплуатации.
4. Рассчитать стоимость бетонов.
5. Рассчитать объём работ.

При расчёте бетонов для разных типов гидротехнических сооружений используют разные комбинации подбора по каждому из классов бетона, при этом рассматривают следующие варианты: применение бетона одного, двух, трёх и более классов.

После завершения подсчётов нескольких вариаций подборов класса бетона для гидротехнических сооружений можно посчитать затрачиваемый объём работ на строительство данных параметров конструкций, следовательно, определить оптимально выгодный вариант для строительства требуемых объектов.

Результаты и дискуссия

В качестве примера для расчётов были взяты средние значения объёмов платформ гравитационного типа и сухого дока. Учитывая все требования и нормы к гидротехническому бетону, а также данные по стоимости компонентов бетона, был проведён расчёт и анализ по двум гидротехническим сооружениям: платформе гравитационного типа и сухому доку.

Ниже приведены таблицы с данными по каждому из типов гидротехнических сооружений:

- 1) для платформы с основанием гравитационного типа в средних значениях (табл. 1);
- 2) для сухого дока в средних значениях (табл. 2).

Таблица 1 / Table 1

Данные платформы гравитационного типа для расчётов
Gravity platform data for calculations

Размеры основания, м	134,0 × 101,4 × 13,4
Высота колонн, м	54,6
Диаметр колонны, средний, м	25,6
Высота всей конструкции, м	144
Вес базы, т	20000
Вес платформы, т	200000
Вес всего, т	220000
Объём стенок основания, м ³	71000
Объём всех колонн, м ³	16870
Объём всех колонн + основание, м ³	81000
Объём всего, м ³	101000

Таблица 2 / Table 2

Данные сухого дока для расчётов
Dry dock data for calculations

Размер камеры сухого дока, м	491 × 114 × 14
Объём наполнения при среднем уровне моря, м ³	582 204
Отметка верха стен, м	+2,5
Размер днища, м	491 × 110
Размер зоны тяжёлых нагрузок, м	474,5 × 30
Отметка днища, м	-11,5
Размер зоны лёгких нагрузок, м	474,5 × 18/16,015
Размер плиты порога, м	114 × 19 × 2,5
Габариты западного устоя ворот, м	19 × 16,8 × 16,5

По имеющимся данным и климатическим условиям для Охотского моря можно подобрать оптимальный состав бетона для гидротехнических сооружений в местных условиях эксплуатации. По минимальной прочности на сжатие подходят бетоны классов В45, В40, В37. Средняя минимальная температура воздуха в году не опускается ниже -30°C , данным условиям соответствует морозостойкость не ниже F₂₃₀₀. Средняя солёность морской воды – 32,5 промилле, удовлетворяет условию водонепроницаемости бетона не ниже W8. Минимальный расход цемента – 340 кг/м³, исходя из определения технологического расчёта тепловыделения бетонной смеси. Содержание воздуха определено от 5% до 8%, для заполнителей – от 14 до 20 мм. Водоцементное отношение – 0,4.

По вышеуказанным данным, исходя из общих объёмов конструкции и максимально заданной высоты волны в 15 м для морской акватории Охотского моря, получены данные для каждого типа гидротехнического сооружения в процентном соотношении объёмов, для определённых зон воздействия на сооружение (табл. 3 и 4).

Таблица 3 / Table 3

Типы зон воздействия для гравитационной платформы
Impact zone types for the gravity platform

Тип зоны воздействия	Процентное соотношение	Объём зоны конструкции
XS3	12%	12150 м ³
XS2	52%	52850 м ³
XA2	16%	16000 м ³
XF4	8%	8000 м ³
XS1	12%	12000 м ³

Таблица 4 / Table 4

Типы зон воздействия для сухого дока
Impact zone types for the dry dock

Тип зоны воздействия	Процентное соотношение	Объём зоны конструкции
XS3	18%	36600 м ³
XS2	28%	55000 м ³
XA2	46%	91800 м ³
XS1	8%	16600 м ³

Для платформы гравитационного типа был проведён расчёт с использованием исходных данных, в которых выявлены минимальные допустимые требования к гидротехническому бетону по каждой зоне воздействия на сооружение. Соответственно, можно выявить из данных параметров объём каждой из этих зон для пересчёта общей стоимости бетона на данную конструкцию. Ниже рассмотрены три варианта использования классов гидротехнического бетона (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Расчёт стоимости классов бетона для гравитационной платформы
Calculation of concrete grades for the gravity platform

Тип зоны воздействия	Минимально допустимый класс бетона	% зон воздействия	Объём зоны воздействия	Стоимость бетона по классам, млн руб.		
				В45	В45 + В40	В45+В40+В37
XS3	В45	12%	12150 м ³	75,087	75,087	75,087
XS2	В45	52%	52850 м ³	326,613	326,613	326,613
XA2	В40	16%	16000 м ³	98,88	96,192	96,192
XF4	В40	8%	8000 м ³	49,44	48,096	48,096
XS1	В37	12%	12000 м ³	74,16	72,144	69,984
Замесы				5	10	15
Всего				629,2	628,1	631,0

Путём анализа выявлено, что стоимость подбора состава на каждый дополнительный класс бетона для сооружения составляет около 5 млн руб. На каждый последующий вариант расчёта подбирались дополнительные классы бетона по минимальным требованиям на каждую зону воздействия путём умножения объёма каждой зоны на среднюю стоимость бетона. Полученные стоимости по каждой зоне суммировались вместе, также учитывается увеличение стоимости лабораторных разработок в зависимости от количества используемых классов бетона. Наиболее выгодный вариант выявился с применением бетонов класса В45 и В40.

Аналогичный анализ стоимости был произведён для сухого дока (табл. 6). Несмотря на разные пропорции соотношения объёмов разных классов бетона и типов сооружения, результат оказался наиболее выгодным при применении бетона классов В45 и В40.

Таблица 6 / Table 6

Расчёт стоимости классов бетона для сухого дока
Calculation of concrete grades for the dry dock

Тип зоны воздействия	Минимально допустимый класс бетона	% зон воздействия	Объём зоны воздействия	Стоимость бетона по классам, млн руб.		
				В45	В45 + В40	В45+В40+В37
XS3	В45	18,3%	36600 м ³	226,188	226,188	226,188
XS2	В45	27,5%	55000 м ³	339,9	339,9	339,9
XA2	В40	45,9%	91800 м ³	567,324	551,9	551,9
XF4	В40	8,3%	16600 м ³	102,588	99,799	96,811
Замесы				5	10	15
Всего				1241,0	1227,8	1229,8

Далее рассмотрены варианты расчётов с учётом затрат на выполнение строительных работ по данным объектам. В среднем на стоимость строительных материалов, в данном случае бетона, ориентировочная стоимость работ оценивается в соотношении 1:3, что отображено для платформы гравитационного типа в табл. 7.

Таблица 7 / Table 7

Расчёт стоимости классов бетона, с учётом строительных работ, для гравитационной платформы

Costs of concrete grades including civil works for gravity platform

Тип зоны воздействия	Минимально допустимый класс бетона	% зон воздействия	Объём зоны воздействия	Стоимость бетона по классам, млн руб.		
				В45	В45 + В40	В45+В40+В37
XS3	В45	12%	12150 м ³	225,261	225,261	225,261
XS2	В45	52%	52850 м ³	979,839	979,839	979,839
XA2	В40	16%	16000 м ³	296,64	288,576	288,576
XF4	В40	8%	8000 м ³	148,32	144,288	144,288
XS1	В37	12%	12000 м ³	222,48	216,432	209,952
Замесы				5	10	15
Всего				1877,5	1864,4	1862,9

Аналогичный расчёт проведён для сухого дока (табл. 8).

Из анализа стоимостей, проведённого выше, для двух типов сооружений видим, что результат выбора класса бетона при использовании В45, В40 и В37 получился одинаковым. Разница в стоимостях каждого класса бетона составила менее 1%.

Несмотря на экономическую выгоду в данном применении трёх классов бетона, выбор бетона классов В40 и В45 является более выгодным, оптимально-технологическим вариантом, так как уровень качества сооружения при данном подборе выше. При этом повышение эффективности бетонов возникает при замыкании их жизненного цикла – повторном использовании бетонного лома.

Таблица 8 / Table 8

Расчёт стоимости классов бетона, с учётом строительных работ, для сухого дока
Costs of concrete grades including civil works for dry dock

Тип зоны воздействия	Минимально допустимый класс бетона	% зон воздействия	Объём зоны воздействия	Стоимость бетона по классам, млн руб.		
				B45	B45 + B40	B45+B40+B37
XS3	B45	18,3%	36600 м3	678,564	678,564	678,564
XS2	B45	27,5%	55000 м3	1019,7	1019,7	1019,7
XA2	B40	45,9%	91800 м3	1701,972	1655,7048	1655,7048
XF4	B40	8,3%	16600 м3	307,764	299,398	290,434
Замесы				5	10	15
Всего				3713	3663,4	3659,4

Определённые препятствия на пути масштабного использования бетонного лома приведены на рис. 2. Основная проблема – нестабильность характеристик вторичного сырья и низкая осведомлённость подрядчиков об их преимуществах.



Рис. 2. Комплекс препятствий повторного использования строительных отходов

Fig. 2. Complex of obstacles to the reuse of construction waste

Расстояние между перерабатывающими заводами и строительными площадками легко нивелировать. На месте снесённых зданий и сооружений можно без дополнительных затрат возвести новые объекты с помощью простейших дробилок и мельниц. Низкий спрос и предложение объясняется незнанием этого вопроса участниками широкомасштабного строительства. Как только малые и крупные строительные компании начнут использовать отходы сноса в качестве вторичного заполнителя, спрос и предложение начнут расти лавинообразно. Восприятие клиента начнёт меняться столь же интенсивно. Низкое качество заполнителей из бетонного лома можно значительно улучшить путём тщательной сортировки и измельчения.

Учёные и практики сталкиваются с проблемой подготовки стандартов и спецификаций для использования различных типов переработанных заполнителей. Имея это в виду, можно предположить, что скоро в ряде стран будут введены налоговые льготы для строителей, которые перерабатывают отходы сноса. Один из вариантов технологии вовлечения в повторный оборот бетонного лома приведён на рис. 3.



Рис. 3. Процесс переработки бетонного лома

Fig. 3. Concrete scrap recycling process

Бетоны, изготовленные с полной заменой природного заполнителя на вторичный, обладают высоким качеством. Использование вторичных заполнителей в бетонах даёт около 80% показателей физико-механических свойств по сравнению с бетоном, изготовленным с применением природных заполнителей. Одна из основных причин снижения прочности связана с низкой прочностью контактной зоны между цементным камнем и заполнителем. Возможными способами улучшения свойств бетона с применением вторичных заполнителей является применение термовлажностного отверждения, использование пуццолановых материалов и т.д. Для снижения негативного влияния на прочность композита необходимо определять химические примеси в применяемых материалах на основе бетонного лома.

Выводы

Проведено проектирование состава гидротехнического бетона с учётом его жизненного цикла. В ходе всесторонних исследований получены и доказаны следующие результаты:

1. Учитывая все требования и нормы к гидротехническому бетону, а также данные по стоимости компонентов бетона, проведён расчёт и анализ по двум гидротехническим сооружениям: платформе гравитационного типа и сухому доку.

2. Несмотря на экономическую выгоду в данном применении бетона трёх классов, выбор бетона классов В40 и В45 является более выгодным, оптимально-технологическим вариантом, так как уровень качества сооружения при данном подборе выше. При этом повышение эффективности бетонов возникает при замыкании их жизненного цикла – повторном использовании бетонного лома.

3. Возможными способами улучшения свойств бетона с применением вторичных заполнителей является применение термовлажностного отверждения, использование пуццолановых материалов и т.д. Для снижения негативного влияния на прочность композита необходимо определять химические примеси в применяемых материалах на основе бетонного лома.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Е.Н. Пипко, Е.Е. Помников – разработка концепции и дизайна исследования; О.А. Тюрикова, Р.Г. Рамазанов, Чжан Сюань – сбор данных, проведение исследований, интерпретация результатов; Р.С. Федюк, Л.П. Нагрузова – анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

E.N. Pipko, E.E. Pomnikov – development of the concept and design of the study; O.A. Tyurikova, R.G. Ramazanov, Zhang Xuan – data collection, research, interpretation of results; R.S. Fediuk, L.P. Nagruzova – analysis and interpretation of the results; preparation and editing of the text. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Datta Dip S., Islam M., Sobuz Rahman Md. H., Ahmed S., Kar M. Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Iss. 5. P. e26888. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26888>.
2. Waqar A., Houda M., Ahsan M., Nisar S. Enhancing project performance through sustainable supply chain management: A comprehensive analysis of residential construction practices // *Environmental Challenges*. 2025. Vol. 18. P. 101075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101075>.
3. Yuan L., Yang B., Lu W., Peng Z. Carbon footprint accounting across the construction waste lifecycle: A critical review of research // *Environmental Impact Assessment Review*. 2024. Vol. 107. P. 107551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107551>.
4. León-Romero L.P., Aguilar-Fernández M., Luque-Sendra A., Zamora-Polo F., Francisco-Márquez M. Characterization of the information system integrated to the construction project management systems // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Iss. 11. P. e31886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31886>.
5. Celik Y., Petri I., Rezgui Y. Integrating BIM and Blockchain across construction lifecycle and supply chains // *Computers in Industry*. 2023. Vol. 148. P. 103886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103886>.
6. Larbi Amo J., Tang L.C.M., Larbi Amo R., Abankwa D.A., Danquah Darko R. Developing an integrated digital delivery framework and workflow guideline for construction safety management in a project delivery system // *Safety Science*. 2024. Vol. 175. P. 106486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106486>.
7. Ninan J., Yadav R. Megaproject and the city: Theorizing social media discourses across the lifecycle of an infrastructure project // *City and Environment Interactions*. 2023. Vol. 20. P. 100123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100123>.
8. Abuhussain Awad M., Waqar A., Khan Mateen A., Othman I., Alotaibi Saad B., Althoey F., Abuhussain M. Integrating Building Information Modeling (BIM) for optimal lifecycle management of complex structures // *Structures*. 2024. Vol. 60. P. 105831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105831>.
9. Saradara Mohamed S., Khalfan Ali M.M., Jaya Venu S., Swarnakar V., Rauf A., Fadel M. El. Advancing building construction: A novel conceptual framework integrating circularity with modified lean project delivery systems // *Developments in the Built Environment*. 2024. Vol. 20. P. 100531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100531>.
10. Adu-Amankwa N.A.N., Rahimian F. Pour, Dawood N., Park C. Digital Twins and Blockchain technologies for building lifecycle management // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 155. P. 105064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105064>.
11. Huaizhi Su, Nan Zhang, Hao Li. Concrete piezoceramic smart module pairs-based damage diagnosis of hydraulic structure // *Composite Structures*. 2018. Vol. 183. P. 582–593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.010>
12. Flavien Vulliet, Mahdi Ben Ftima, Pierre Léger. Stability of cracked concrete hydraulic structures by nonlinear quasi-static explicit finite element and 3D limit equilibrium methods // *Computers & Structures*. 2017. Vol. 184. P. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.02.007>

13. Shenhua Liu, Weizhong Chen, Jingqiang Yuan. A coupled hydraulic-mechanical-chemical peridynamic model for simulating corrosion-induced failure of unsaturated reinforced concrete under hydraulic pressure // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2025. Vol. 174. P. 106177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2025.106177>
14. Liu Zimei, Ge Xueliang, Lu Cairong, Zhang Zhengnan, Duan Yuwei, Jiang Yuanyuan. A novel damage constitutive model for high air-content hydraulic concrete in ultra-low temperature freeze-thaw and load coupling // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 104. P. 112385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112385>
15. Chi Zhang, Shuaixiao Gao, Ye Wang, Xin Zhang, Hongqiang Chu, Huajie Huang, Fanrun Huang, Hainan Wu, Xinyan Xiong. A novel metal-free fluorine-free self-cleaning coating with photocatalytic activity and superhydrophobicity based on RP/HTCC@PDMS for hydraulic concrete // *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 363, Part 2. P. 132142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132142>
16. Jie-jing Chen, Khant Swe Hein, Guanghua Lyu, Long Xiao, Wei-Liang Jin, Jin Xia. Influence of frequency condition of dynamic hydraulic pressure on chloride transport in concrete // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 458. P. 139529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139529>
17. Shaolun He, Jing Cao, Junrui Chai, Yi Yang, Shuai Liu, Yuan Qin, Zengguang Xu. Meso-damage of concrete hydraulic fracturing considering the temperature difference effect // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 456. P. 139203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139203>
18. Zimei Liu, Xueliang Ge, Cairong Lu, Zhengnan Zhang, Yuwei Duan, Yuanyuan Jiang. Performance evolution and damage constitutive model of high air content hydraulic concrete coupled freeze-thaw and loads // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 453. P. 139015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139015>
19. Riccardo Stucchi. Hydromechanical behaviour of reinforced concrete linings in hydraulic tunnels: transient // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering and Computational Mechanics*. 2025. Vol. 178, Iss. 1. P. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.1680/jencm.24.00067>
20. Mingyue Chen, Xin Kang, Yongqing Chen, Renpeng Chen. Unveiling the synergistic effects of stray current and high hydraulic pressure on chloride transport in ultra-high-performance concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2025. Vol. 157. P. 105957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105957>
21. Jian-Tao Wang, Kai-Lin Yang, Yang Yang. Influence of internal and external hydraulic pressures on torsional resistance of steel-concrete double skin composite tubes // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2025. Vol. 214. P. 105424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105424>
22. Jin Xia, Jie-jing Chen, Xiaoyu He, Keyu Chen, Wei-liang Jin. Comparative analysis of microdamage-affected chloride transport in concrete under static and dynamic hydraulic pressure // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. P. 110184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110184>
23. Zhe Huang, Jiazhang Cao, Fuyuan Gong, Ding Nie, Wenwei Li, Peng Lin, He Zhang. Multi-scale thermo-poro-mechanical simulation of the frost resistance of low-heat and moderate-heat hydraulic concrete considering the aging microstructure // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 453. P. 139062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139062>
24. Yanlong Li, Yaofei Liu, Hanyu Guo, Yang Li. Investigation of the freeze-thaw deterioration behavior of hydraulic concrete under various curing temperatures // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. P. 110247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110247>
25. Riccardo Stucchi. Hydro-mechanical behaviour of reinforced concrete linings in hydraulic tunnels: steady state // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering and Computational Mechanics*. Vol. 177, Iss. 3–4. P. 70–82. DOI: <https://doi.org/10.1680/jencm.24.00020>
26. Kun Wang, Jinjun Guo, Juan Wang, Yuanxun Zheng, Peng Zhang, Hongjian Du. Numerical and experimental analysis of the effect of multi-ion electrical coupling on the sulfate convection zone in hydraulic concrete // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 449. P. 138340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138340>
27. Jie-jing Chen, Qing-feng Liu, Wei-liang Jin, Jin Xia. Experiment and simulation on the coupled effects of calcium leaching and chloride transport in concrete under hydraulic pressure // *Cement and Concrete Composites*. 2025. Vol. 155. P. 105834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105834>
28. Павленко А.Д., Ким Л.В. Применение лёгкого бетона в гидротехническом строительстве в

- условиях Крайнего Севера // Трибуна учёного. 2024. Вып. 5. С. 1–5.
29. Алексейко Л.Н., Таскин А.В. О комплексной переработке золошлаковых отходов энергетики // Экология и развитие общества. Труды IX Международной конференции. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ). 2005. С. 12–21.
 30. Алексейко Л.Н., Таскин А.В., Черепанов А.А. Технологическая линия для переработки золошлаковых отходов – продуктов сжигания угольного топлива // Патент на изобретение RU 2489214 C1, 10.08.2013. Заявка № 2012123064/03 от 04.06.2012.

REFERENCES

1. Datta Dip S., Islam M., Sobuz Rahman Md. H., Ahmed S., Kar M. Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 5, p. e26888. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26888>.
2. Waqar A., Houda M., Ahsan M., Nisar S. Enhancing project performance through sustainable supply chain management: A comprehensive analysis of residential construction practices. *Environmental Challenges*, 2025, vol. 18, p. 101075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101075>.
3. Yuan L., Yang B., Lu W., Peng Z. Carbon footprint accounting across the construction waste lifecycle: A critical review of research. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, vol. 107, p. 107551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107551>.
4. León-Romero L.P., Aguilar-Fernández M., Luque-Sendra A., Zamora-Polo F., Francisco-Márquez M. Characterization of the information system integrated to the construction project management systems. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 11, p. e31886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31886>.
5. Celik Y., Petri I., Rezgui Y. Integrating BIM and Blockchain across construction lifecycle and supply chains. *Computers in Industry*, 2023, vol. 148, p. 103886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103886>.
6. Larbi Amo J., Tang L.C.M., Larbi Amo R., Abankwa D.A., Danquah Darko R. Developing an integrated digital delivery framework and workflow guideline for construction safety management in a project delivery system. *Safety Science*, 2024, vol. 175, p. 106486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106486>.
7. Ninan J., Yadav R. Megaproject and the city: Theorizing social media discourses across the lifecycle of an infrastructure project. *City and Environment Interactions*, 2023, vol. 20, p. 100123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100123>.
8. Abuhussain Awad M., Waqar A., Khan Mateen A., Othman I., Alotaibi Saad B., Althoey F., Abuhussain M. Integrating Building Information Modeling (BIM) for optimal lifecycle management of complex structures. *Structures*, 2024, vol. 60, p. 105831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105831>.
9. Saradara Mohamed S., Khalfan Ali M.M., Jaya Venu S., Swarnakar V., Rauf A., Fadel M. El. Advancing building construction: A novel conceptual framework integrating circularity with modified lean project delivery systems. *Developments in the Built Environment*, 2024, vol. 20, p. 100531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100531>.
10. Adu-Amankwa N.A.N., Rahimian F. Pour, Dawood N., Park C. Digital Twins and Blockchain technologies for building lifecycle management. *Automation in Construction*, 2023, vol. 155, p. 105064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105064>.
11. Huaizhi Su, Nan Zhang, Hao Li. Concrete piezoceramic smart module pairs-based damage diagnosis of hydraulic structure. *Composite Structures*, 2018, vol. 183, pp. 582–593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.010>.
12. Flavien Vulliet, Mahdi Ben Ftima, Pierre Léger. Stability of cracked concrete hydraulic structures by nonlinear quasi-static explicit finite element and 3D limit equilibrium methods. *Computers & Structures*, 2017, vol. 184, pp. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.02.007>.
13. Shenhua Liu, Weizhong Chen, Jingqiang Yuan. A coupled hydraulic-mechanical-chemical peridynamic model for simulating corrosion-induced failure of unsaturated reinforced concrete under hydraulic pressure. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2025, vol. 174, p. 106177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2025.106177>.
14. Liu Zimei, Ge Xueliang, Lu Cairong, Zhang Zhengnan, Duan Yuwei, Jiang Yuanyuan. A novel damage constitutive model for high air-content hydraulic concrete in ultra-low temperature freeze-thaw and load coupling. *Journal of Building Engineering*, 2025, vol. 104, p. 112385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112385>.

15. Chi Zhang, Shuaixiao Gao, Ye Wang, Xin Zhang, Hongqiang Chu, Huajie Huang, Fanrun Huang, Hainan Wu, Xinyan Xiong. A novel metal-free fluorine-free self-cleaning coating with photocatalytic activity and superhydrophobicity based on RP/HTCC@PDMS for hydraulic concrete. *Separation and Purification Technology*, 2025, vol. 363, part 2, p. 132142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132142>
16. Jie-jing Chen, Khant Swe Hein, Guanghua Lyu, Long Xiao, Wei-Liang Jin, Jin Xia. Influence of frequency condition of dynamic hydraulic pressure on chloride transport in concrete. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 458, p. 139529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139529>
17. Shaolun He, Jing Cao, Junrui Chai, Yi Yang, Shuai Liu, Yuan Qin, Zengguang Xu. Meso-damage of concrete hydraulic fracturing considering the temperature difference effect. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 456, p. 139203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139203>
18. Zimei Liu, Xueliang Ge, Cairong Lu, Zhengnan Zhang, Yuwei Duan, Yuanyuan Jiang. Performance evolution and damage constitutive model of high air content hydraulic concrete coupled freeze-thaw and loads. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 453, p. 139015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139015>
19. Riccardo Stucchi. Hydromechanical behaviour of reinforced concrete linings in hydraulic tunnels: transient. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering and Computational Mechanics*, 2025, vol. 178, iss. 1, p. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenm.24.00067>
20. Mingyue Chen, Xin Kang, Yongqing Chen, Renpeng Chen. Unveiling the synergistic effects of stray current and high hydraulic pressure on chloride transport in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2025, vol. 157, p. 105957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105957>
21. Jian-Tao Wang, Kai-Lin Yang, Yang Yang. Influence of internal and external hydraulic pressures on torsional resistance of steel-concrete double skin composite tubes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2025, vol. 214, p. 105424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105424>
22. Jin Xia, Jie-jing Chen, Xiaoyu He, Keyu Chen, Wei-liang Jin. Comparative analysis of microdamage-affected chloride transport in concrete under static and dynamic hydraulic pressure. *Journal of Building Engineering*, 2024, vol. 95, p. 110184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110184>
23. Zhe Huang, Jiazhang Cao, Fuyuan Gong, Ding Nie, Wenwei Li, Peng Lin, He Zhang. Multi-scale thermo-poro-mechanical simulation of the frost resistance of low-heat and moderate-heat hydraulic concrete considering the aging microstructure. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 453, p. 139062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139062>
24. Yanlong Li, Yaofei Liu, Hanyu Guo, Yang Li. Investigation of the freeze-thaw deterioration behavior of hydraulic concrete under various curing temperatures. *Journal of Building Engineering*, 2024, vol. 95, p. 110247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110247>
25. Riccardo Stucchi. Hydro-mechanical behaviour of reinforced concrete linings in hydraulic tunnels: steady state. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering and Computational Mechanics*, vol. 177, iss. 3–4, pp. 70–82. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenm.24.00020>
26. Kun Wang, Jinjun Guo, Juan Wang, Yuanxun Zheng, Peng Zhang, Hongjian Du. Numerical and experimental analysis of the effect of multi-ion electrical coupling on the sulfate convection zone in hydraulic concrete. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 449, p. 138340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138340>
27. Jie-jing Chen, Qing-feng Liu, Wei-liang Jin, Jin Xia. Experiment and simulation on the coupled effects of calcium leaching and chloride transport in concrete under hydraulic pressure. *Cement and Concrete Composites*, 2025, vol. 155, p. 105834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105834>
28. Pavlenko A.D., Kim L.V. Application of lightweight concrete in hydraulic engineering in the Far North. *Tribune of the scientist*, 2024, iss. 5, pp. 1–5. (In Russ.).
29. Alekseiko L.N., Taskin A.V. On the complex processing of ash and slag waste from the energy sector. *Ecology and development of society. Proceedings of the IX International Conference. International Academy of Sciences of Ecology, Human and Nature Safety (MANEB)*, 2005, p. 12–21. (In Russ.).
30. Alekseiko L.N., Taskin A.V., Cherepanov A.A. Technological line for processing ash and slag waste – products of coal fuel combustion. Patent for invention RU 2489214 C1, 10.08.2013. Application No. 2012123064/03 dated 04.06.2012. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пипко Елена Николаевна – старший преподаватель, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ pipko.en@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2725-9643>

Elena N. Pipko, Senior Lecturer, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Федюк Роман Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор военного учебного центра, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация); главный научный сотрудник, Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству (Владивосток, Российская Федерация),

✉ roman44@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

Roman S. Fediuk, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Military Training Center, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation); Chief Researcher, Far Eastern Research, Design and Technological Institute for Construction (Vladivostok, Russian Federation).

Помников Егор Евгеньевич – кандидат технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ pomnikov.ee@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2165-3038>

Egor E. Pomnikov, Candidate of Technical Sciences, Professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Нагрузова Любовь Петровна – доктор технических наук, доцент, профессор, Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова (Абакан, Российская Федерация),

✉ l_nag@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7295-6557>

Lyubov P. Nagruzova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, N.F. Katanov Khakass State University (Abakan, Russian Federation).

Тюрикова Ольга Алексеевна – ассистент, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ tyurikova.oa@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0249-4844>

Olga A. Tyurikova, Assistant, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Рамазанов Рустам Габтиларифович – аспирант, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация),

✉ ramazanov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5501-3755>

Rustam G. Ramazanov, Postgraduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation).

Чжан Сюань – аспирант, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация),

✉ Zhang@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9245-2028>

Zhang Xuan, Postgraduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 18.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 23.04.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

Научная статья

УДК 556.06

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/157-168>

Пространственное обобщение данных метеорологической сети на водосборах арктических рек Таз, Пур и Надым

Надежда Александровна Волкова^{1,2,✉}, Ксения Владимировна Ромашова²,
Андрей Михайлович Голубков²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ na_san@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты пространственного обобщения данных гидрометеорологической сети для водосборов арктических рек Таз, Пур и Надым. Исследование направлено на анализ изменений температуры воздуха и атмосферных осадков в условиях сокращения наблюдательной сети и глобального потепления. На основе данных метеостанций выявлен значимый положительный тренд температуры ($0,023\text{--}0,033^\circ\text{C}/\text{год}$), наиболее выраженный в северных районах. Анализ осадков показал их неоднородное распределение и расхождения между разными источниками данных (УГМС и meteo.ru). Методы пространственной интерполяции подтвердили устойчивость температурных полей и высокую изменчивость осадков, обусловленную локальными факторами. Полученные результаты важны для понимания климатических изменений в Арктике и могут быть использованы для прогнозирования гидрологического режима рек.

Ключевые слова: арктические реки, гидрометеорологическая сеть, пространственное обобщение, температура воздуха, атмосферные осадки, климатические изменения

Для цитирования: Волкова Н.А., Ромашова К.В., Голубков А.М. Пространственное обобщение данных метеорологической сети на водосборах арктических рек Таз, Пур и Надым // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 157–168.

Original article

Spatial generalization of meteorological network data in the catchment areas of the Arctic rivers Taz, Pur and Nadym

Nadezhda A. Volkova^{1,2,✉}, Ksenia V. Romashova², Andrey M. Golubkov²

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ na_san@mail.ru

Abstract. The article presents the results of spatial generalization of hydrometeorological network data for the catchment areas of the Arctic rivers Taz, Pur and Nadym. The study is aimed at analyzing changes in air temperature and precipitation in the context of a reduction in the observation network and global warming. Based on meteorological station data, a significant positive temperature trend ($0.023\text{--}0.033^\circ\text{C}/\text{year}$) was revealed, which was most pronounced in the northern regions. Precipitation analysis showed its non-uniform distribution and discrepancies between different data sources (UGMS and meteo.ru). Spatial interpolation methods confirmed the stability of temperature fields and high precipitation variability caused by local factors. The results obtained are important for understanding climate change in the Arctic and can be used to predict the hydrological regime of rivers.

Keywords arctic rivers, hydrometeorological network, spatial generalization, air temperature, atmospheric precipitation, climate change

For citation: Volkova N.A., Romashova K.V., Golubkov A.M. Spatial generalization of meteorological network data in the catchment areas of the Arctic rivers Taz, Pur and Nadym. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 157–168. (In Russ.).

Введение

Изучать гидрометеорологические процессы в арктических регионах важно в условиях глобальных климатических изменений, которые проявляются наиболее ярко именно в северных широтах. Реки Таз, Пур и Надым являются типичными представителями средних арктических рек. Однако из-за сложности доступа к данным и ограничений в развитии гидрометеорологической сети наблюдений информация о пространственном распределении основных климатических и гидрологических параметров остаётся фрагментарной.

Пространственное обобщение данных позволяет преодолевать недостатки разрывистости наблюдений и создавать более полную картину распределения метеорологических и гидрологических характеристик по территории водосборов.

За последние годы гидрометеорологическая сеть сократилась в исследуемом регионе [1–2].

Цель исследования заключается в проведении пространственного обобщения данных метеорологической сети по двум наборам станций для водосборов арктических рек Таз, Пур и Надым для сравнения распределения температуры воздуха и атмосферных осадков.

Характеристика региона исследования

Бассейны рек Таз, Пур и Надым расположены в арктической зоне Западной Сибири (рис. 1), на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) и частично Красноярского края. Реки впадают в Обско-Тазовскую губу Карского моря. Схема водосборов представлена на рис. 1.

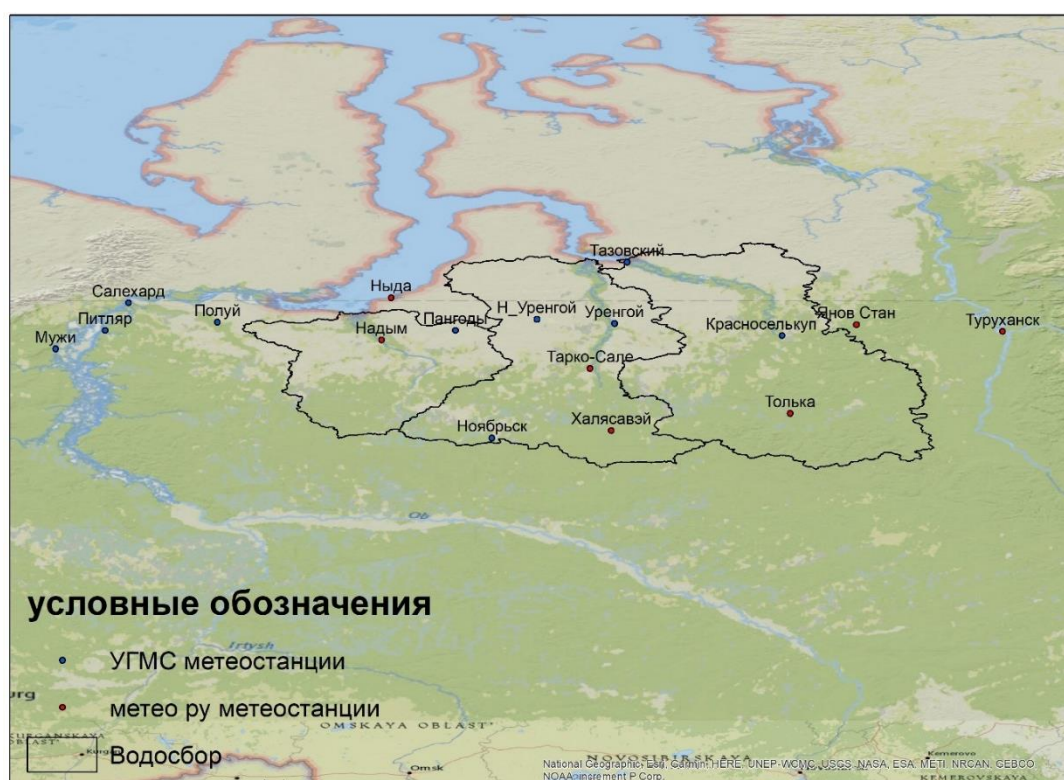


Рис. 1. Водосборы исследуемых рек и расположение метеорологических станций

Fig. 1. Catchments of the rivers under study and the location of meteorological stations

Длина реки Таз составляет около 935 км, площадь водосбора – 108,7 тыс. км². Бассейн охватывает преимущественно тундровые и субарктические территории, с юга гранича с лесотундрой.

Протяжённость реки Пур – 694 км, площадь водосбора – 45,8 тыс. км². Пур протекает через Ямало-Ненецкий автономный округ и характеризуется более компактным бассейном, чем Таз.

Река Надым имеет длину 513 км и площадь водосбора 35,9 тыс. км². Водосбор Надыма находится преимущественно в пределах лесотундры.

Все три реки протекают по территориям, где глубина многолетней мерзлоты может достигать значительных величин. Рельеф бассейнов преимущественно равнинный.

Климат бассейнов рек Таз, Пур и Надым относится к полярному и субарктическому типу. Основные характеристики:

- среднегодовая температура воздуха колеблется от -6 до -9°C. Зима длительная и суровая, со средними температурами января от -25 до -35°C. Лето короткое и прохладное, со средними температурами июля от +8 до +12°C;
- общее количество осадков невелико и составляет 200–400 мм в год. Максимум осадков приходится на период с июня по сентябрь;
- средняя высота снежного покрова составляет 30–50 см, продолжительность его залегания – около 200 дней в году;
- преобладают западные и северо-западные ветры, которые определяют характер переноса воздушных масс и распределение осадков.

Климатическая специфика региона оказывает существенное влияние на гидрологический режим рек, формируя их зависимость от сезонных изменений температуры и осадков.

Гидрологический режим рек Таз, Пур и Надым характеризуется выраженной сезонностью и определяется климатическими условиями региона, особенностями рельефа и распространением многолетней мерзлоты.

Основным источником питания является снеговое, которое доминирует в весенний период, когда тает снежный покров. Летом основным источником питания становятся атмосферные осадки. Подземные воды из-за наличия многолетней мерзлоты играют второстепенную роль.

Максимальный расход воды приходится на период с мая по июнь, связанный с половодьем. В этот период наблюдается резкий подъём уровня воды и увеличение расхода.

Минимальный расход воды фиксируется в конце осени и начале зимы. Зимний сток является минимальным в году.

Средняя продолжительность ледостава составляет 220–240 дней в году. Замерзание рек начинается в октябре-ноябре, вскрытие – в мае. Из-за сложного рельефа дна и наличия разрушаемых участков ледового покрова возникают заторы и зажоры, что существенно влияет на уровень воды и характер разливов.

Водосборы рек Таз, Пур и Надым охватывают несколько природно-климатических зон, каждая из которых имеет свои особенности.

Тундра располагается в северной части бассейнов и характеризуется уникальными природными условиями. Здесь преобладает низкорослая растительность, включающая мхи, лишайники и карликовые берёзы. Обилие болотистых участков обусловлены сильным влиянием многолетней мерзлоты, которая играет ключевую роль в гидрологических процессах региона.

Лесотундра занимает южную часть бассейнов и представляет собой переходную зону между тундрой и лесами. В этой зоне преобладают лиственничные и еловые леса, которые чередуются с участками тундровой растительности. Роль лесов здесь значительно возрастает, особенно в регуляции водного стока, что делает лесотундру важным элементом экосистемы.

Субарктика расположена на границе между тундрой и тайгой, сочетая в себе черты обеих природных зон. Для этой зоны характерно более выраженное влияние континентального климата по сравнению с тундрой, что отражается на разнообразии растительности и климатических условиях.

Перечисленные зоны различаются по характеру использования земель, плотности населения и степени антропогенного воздействия.

Методы исследования

1. Гидрометеорологическая сеть наблюдений

Распределение гидрометеорологических постов в бассейнах рек Таз, Пур и Надым имеет неравномерный характер, что существенно влияет на качество данных для пространственного анализа.

Плотность станций наблюдения распределена неравномерно по территории водосборов. Наибольшая концентрация станций отмечается в южной части, где преобладают лесотундровые ландшафты и расположены крупные населённые пункты, такие как Гыдань, Салехард и Надым. В то же время в северных районах, особенно в тундровой зоне, плотность станций значительно ниже из-за труднодоступности местности и суровых климатических условий.

Типы станций различаются в зависимости от их расположения и задач. Метеорологические станции чаще всего размещаются вблизи населённых пунктов, что обеспечивает их доступность для обслуживания. Гидрологические посты, как правило, сосредоточены на основных реках и крупных притоках, тогда как мелкие водотоки остаются вне зоны регулярного наблюдения, что создаёт пробелы в данных.

Пространственные пробелы в сети наблюдений являются значительной проблемой. Многие удалённые участки водосборов, особенно в верховьях рек, остаются неохваченными. Это затрудняет анализ источников питания рек и процессов формирования стока, что ограничивает возможности для полноценного изучения и прогнозирования гидрологических и климатических изменений в регионе.

Гидрометеорологическая сеть наблюдений в бассейнах рек Таз, Пур и Надым представляет собой систему постов (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Перечень действующих метеостанций
List of operating weather stations

Код ВМО	Название	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Дата открытия станции	Наличие данных на meteo.ru
23256	ТАЗОВСКИЙ	67.47	78.73	28	01.10.1932	есть
23330	САЛЕХАРД	66.53	66.67	16	01.01.1982	есть
23339	ПОЛУЙ	66.03	68.68	36	04.10.1949	нет
23345	НЫДА	66.63	72.93	7	21.10.1947	есть
23358	НОВЫЙ УРЕНГОЙ	66.10	76.78	62	01.09.1976	нет
23426	МУЖИ	65.38	64.72	19	01.08.1932	нет
23431	ПИТЛЯР	65.83	65.93	17	01.09.1940	нет
23443	ПАНГОДЫ	65.83	74.50	52	23.02.1974	нет
23445	НАДЫМ	65.47	72.67	19	01.01.1943	есть
23453	УРЕНГОЙ	65.95	78.40	24	07.09.1948	нет
23463	ЯНОВ СТАН	65.98	84.27	40	09.07.1951	есть
23465	КРАСНОСЕЛЬКУП	65.70	82.45	25	01.10.1962	нет
23472	ТУРУХАНСК	65.78	87.93	38	01.12.1843	есть
23552	ТАРКО-САЛЕ	64.92	77.82	27	01.11.1936	есть
23656	ХАЛЯСАВЭЙ	63.38	78.32	67	11.03.1957	есть
23657	НОЯБРЬСК	63.12	75.28	131	27.12.1979	нет
23662	ТОЛЬКА	63.98	82.08	35	27.04.1947	есть

2. Температура воздуха

Анализ данных показал, что на всех исследуемых метеостанциях наблюдается значимый положительный тренд температуры воздуха. Коэффициенты линейного тренда варьируются от 0,023 до 0,033°C/год (таблица 2, рис. 2). Наиболее выраженный рост температуры зафиксирован на станциях Тазовск и Тарко-Сале, что согласуется с общемировыми тенденциями усиления потепления в высоких широтах.

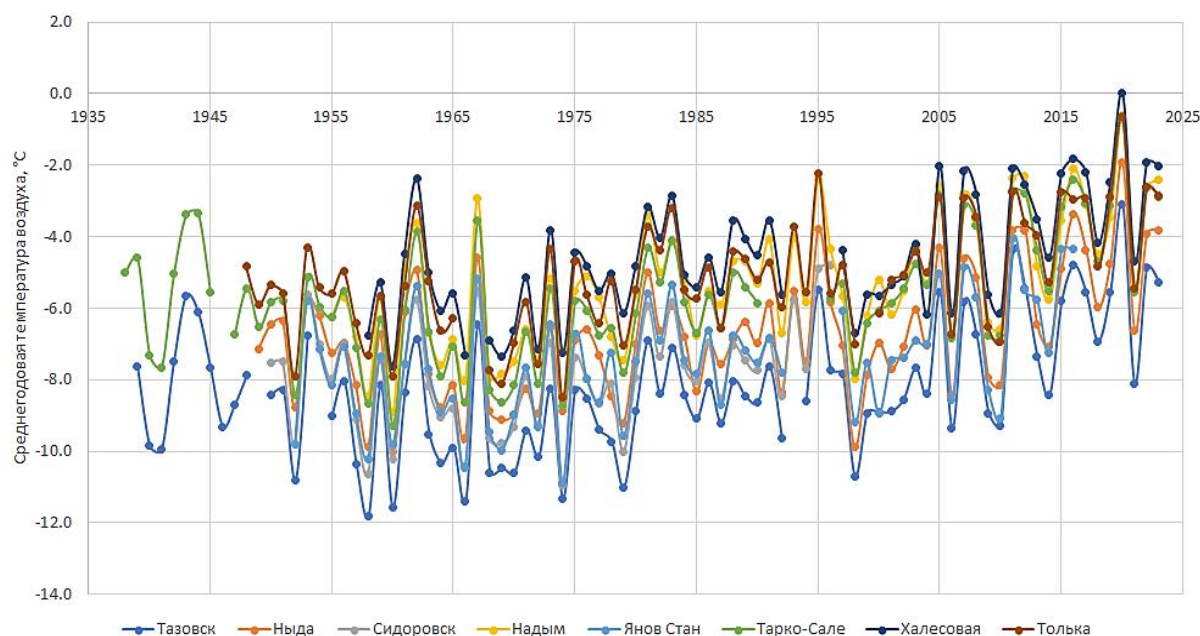


Рис. 2. Хронологический ход среднегодовой температуры воздуха

Fig. 2. Chronological course of average annual air temperature

Для проверки неоднородности рядов использовался t-критерий Стьюдента [3–5]. Временные ряды разделены на два подпериода: ранний (1961–1990) и поздний (1991–2020). Данное временное разделение обусловлено тем, что с 1 июля 2022 года подведомственные учреждения Росгидромета перешли на использование в оперативно-производственной практике климатических норм, рассчитанных за период 1991–2020 годы. По регламенту Всемирной метеорологической организации (ВМО) период осреднения значений метеорологических параметров для получения норм составляет 30 лет.

Результаты тестирования показали, что средние значения температуры в раннем и позднем подпериодах значительно различаются на уровне значимости 5% для всех станций (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Статистические показатели среднегодовой температуры воздуха на метеостанциях бассейнов рек Таз, Пур и Надым (1961–2020 гг.)

Statistical indicators of average annual air temperature at meteorological stations of the Taz, Pur and Nadym river basins (1961–2020)

Параметр	Тазовск	Ныда	Надым	Янов Стан	Тарко-Сале	Халесовая	Толька
Температура за – 1961–1990 гг.	-9.1	-7.4	-5.9	-7.8	-6.4	-5.1	-5.7
– 1991–2020 гг.	-7.3	-6.1	-4.5	-6.3	-4.7	-3.9	-4.4
разница	-1.8	-1.4	-1.4	-1.5	-1.7	-1.1	-1.2
Коэффициент линейного тренда	0.033	0.025	0.027	0.028	0.032	0.023	0.025
Критерий Стьюдента			m=	30	n=	30	
σ1	1.33	1.36	1.42	1.50	1.45	1.38	1.45

Окончание табл. 2

Параметр	Тазовск	Ныда	Надым	Янов Стан	Тарко-Сале	Халесовая	Толька
σ_2	1.82	1.84	1.76	1.70	1.72	1.70	1.59
S	1.59	1.62	1.60	1.60	1.59	1.55	1.52
t	-4.29	-3.27	-3.40	-3.53	-4.12	-2.84	-3.11
tkp	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
Проверка значимости тренда							
R	0.43	0.36	0.39	0.40	0.47	0.36	0.39
σR	0.099	0.102	0.101	0.100	0.097	0.102	0.101
t	4.37	3.57	3.92	4.02	4.80	3.56	3.82
tkp	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66

Выявленный значимый тренд на увеличение температуры воздуха на исследуемых метеостанциях согласуется с глобальными тенденциями ускоренного потепления в Арктическом регионе. Особенно заметно это явление на станциях Тазовск и Тарко-Сале, где коэффициент тренда достигает 0,032–0,033°C/год. Причины такого значительного повышения температуры могут быть связаны как с глобальным изменением климата, так и с локальными факторами, такими как антропогенное воздействие и изменения в характере циркуляции атмосферы.

Неоднородность временных рядов, подтверждённая критерием Стьюдента, указывает на существенные изменения климатического режима за последние 60 лет. Изменения могут быть вызваны как естественными колебаниями климата, так и антропогенными факторами, включая интенсификацию промышленной деятельности в регионе.

3. Атмосферные осадки

Результаты анализа показали, что тренд изменения суммы атмосферных осадков является значимым только для части метеостанций. На станциях Ныда, Янов Стан, Халесовая и Толька тренд незначим (таблица 3, рис. 3). Для станций наблюдаются разнонаправленные изменения осадков.

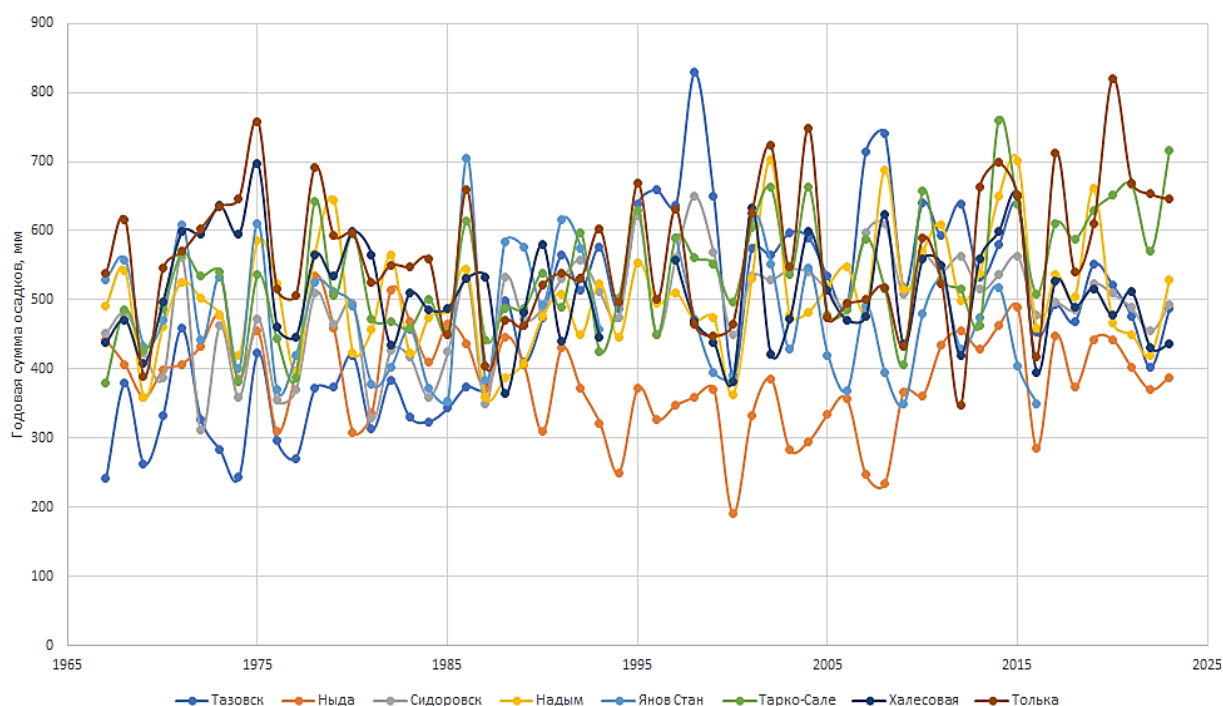


Рис. 3. Хронологический ход годовой суммы атмосферных осадков

Fig. 3. Chronological course of the annual amount of atmospheric precipitation

Таблица 3 / Table 3

**Статистические показатели годовых сумм атмосферных осадков
на метеостанциях бассейнов рек Таз, Пур и Надым (1967–2023 гг.)**
Statistical indicators of annual precipitation at meteorological stations in the Taz, Pur
and Nadym river basins (1967–2023)

Параметр	Тазовск	Ныда	Надым	Янов Стан	Тарко-Сале	Халесовая	Толька
Средняя сумма осадков за – 1967–1994 гг.	380	404	479	491	495	516	555
– 1995–2023 гг.	573	365	531	460	577	504	579
разница	193	-39	52	-31	82	-12	24
Коэффициент линейного тренда	5.21	-0.75	1.32	-1.03	2.74	-0.53	0.82
Критерий Стьюдента			m	28	n	29	
СКО σ_1	92.93	66.93	69.86	92.82	68.33	77.19	82.74
СКО σ_2	99.41	72.40	83.83	79.30	84.26	75.09	114.50
S	96.28	69.77	77.29	86.20	76.85	76.13	100.17
t	-7.55	2.10	-2.54	1.36	-4.03	0.58	-0.91
t _{кр}	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
Проверка значимости тренда							
R	0.64	-0.17	0.27	-0.18	0.52	-0.12	0.14
σR	0.104	0.133	0.130	0.133	0.115	0.134	0.134
t	6.10	-1.31	2.09	-1.33	4.56	-0.89	1.02
t _{кр}	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67

Применение t-критерия Стьюдента (табл. 3, сравнение t и t_{кр}) подтвердило неоднородность временных рядов атмосферных осадков для всех станций, кроме Янов Стан, Халесовая и Толька. Разделение данных на два подпериода (ранний и поздний) показало значимые различия между средними значениями осадков.

Анализ атмосферных осадков выявил разнонаправленные изменения. На станциях Тазовск, Сидоровск, Надым, Тарко-Сале и Толька наблюдалось увеличение суммы осадков, что может быть связано с интенсификацией циклонической активности и повышением влажности воздуха в условиях потепления. На остальных станциях (Ныда, Янов Стан, Халесовая) сумма осадков уменьшилась, что может быть вызвано изменениями в атмосферной циркуляции или снижением влажности из-за уменьшения испарения с поверхности почвы.

Влажность – один из ключевых факторов, влияющих на количество осадков. Однако её роль неоднозначна и зависит от других климатических процессов. Повышенная влажность (из-за роста испарения или адвекции влажных воздушных масс) увеличивает вероятность осадков, так как в атмосфере накапливается больше водяного пара, способного конденсироваться в облака и выпадать в виде дождя или снега. Снижение влажности (из-за уменьшения испарения или усиления антициклональной погоды) может уменьшать осадки, поскольку сухой воздух препятствует образованию облаков. График хода относительной влажности представлен на рис. 4. Результаты статистической обработки приведены в таблице 4.

Усиленное испарение с поверхности океанов и тающей вечной мерзлоты увеличивает влажность воздуха. Атмосфера в высоких широтах становится способной удерживать больше водяного пара (по формуле Клаузиуса – Клапейрона). В бассейнах реки Пур влажность может расти из-за деградации мерзлоты и возникновения новых водоёмов.

Потепление приводит к более раннему сходу снега и иссушению почв, что сокращает испарение во второй половине лета. Антициклональные режимы (блокирующие циклоны) могут препятствовать переносу влаги из океанов. В бассейне реки Таз возможен рост засухливости из-за смещения атмосферных фронтов.

Неоднородность временных рядов атмосферных осадков, подтверждённая критерием Стьюдента, указывает на существенные изменения климатического режима в середине периода наблюдений. Такие изменения могут быть вызваны как естественными колебаниями климата, так и антропогенными факторами, включая интенсификацию промышленной деятельности в регионе.

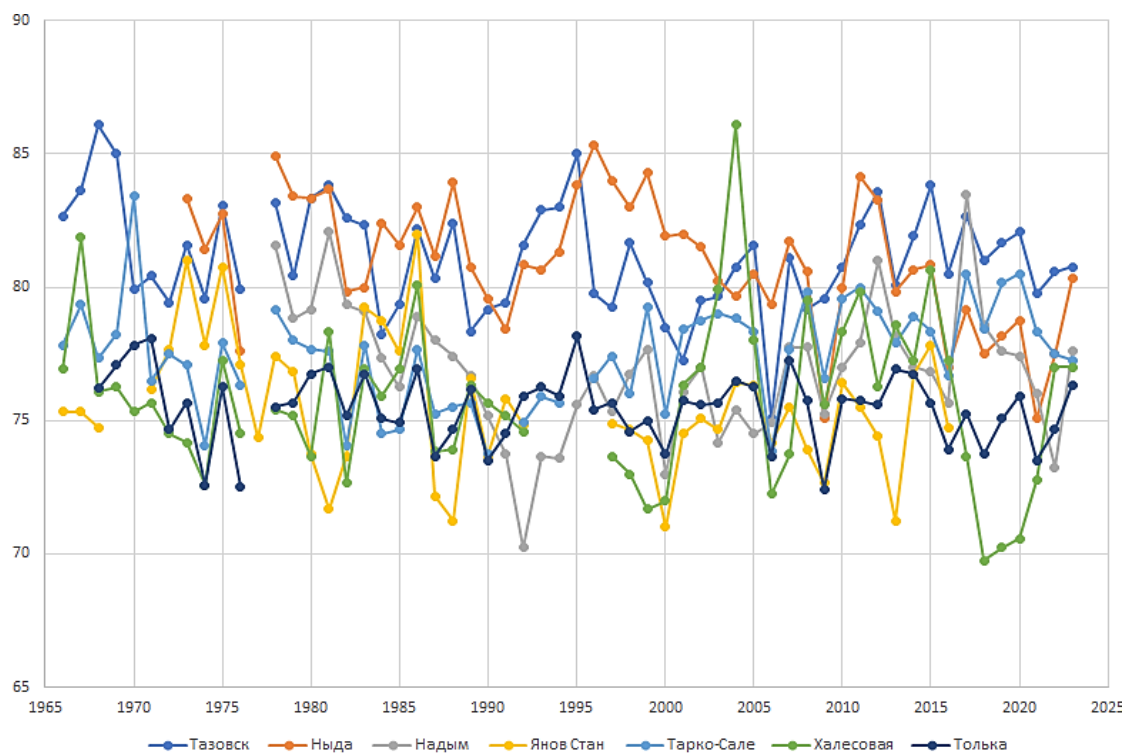


Рис. 4. Хронологический ход среднегодового значения относительной влажности

Fig. 4. Chronological course of the average annual value of relative humidity

Таблица 4 / Table 4

Статистические показатели среднегодовой относительной влажности на метеостанциях бассейнов рек Таз, Пур и Надым (1966–2023 гг.)

Statistical indicators of average annual relative humidity at meteorological stations in the Taz, Pur and Nadym river basins (1966–2023)

Параметр	Тазовск	Ныда	Надым	Янов Стан	Тарко-Сале	Халесовая	Толька
Среднее за							
– 1995–2023 гг.	80.7	80.5	76.7	74.7	78.2	75.8	75.4
разница	-0.9	-1.1	-0.4	-1.5	1.4	0.1	-0.2
Коэффициент линейного тренда	-0.025	-0.080	-0.020	-0.049	0.026	-0.007	-0.013
Критерий Стьюдента	m			29	n	29	
СКО σ_1	2.04	1.90	3.09	2.83	2.07	2.09	1.44
СКО σ_2	1.97	2.65	2.12	1.70	1.60	3.79	1.25
S	2.00	2.31	2.65	2.33	1.85	3.06	1.35
t	1.70	1.80	0.56	2.40	-2.85	-0.11	0.55
ткр	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
Проверка значимости тренда							
R	-0.21	-0.49	-0.10	-0.30	0.23	-0.04	-0.16
σR	0.131	0.117	0.133	0.128	0.130	0.134	0.132
t	-1.59	-4.20	-0.79	-2.34	1.78	-0.30	-1.22
ткр	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67

Результаты пространственной интерполяции данных

По двум наборам метеорологических станций построены карты распределения средне-годовой температуры воздуха и атмосферных осадков (рис. 5).

Первый набор состоит из метеорологических станций, данные которых передаются в УГМС. Второй набор состоит из метеостанций, данные по которым можно получить на сайте meteo.ru в открытом доступе (таблица 1).



Рис. 5. Схема изотерм, построенных по двум наборам метеорологических станций

Fig. 5. Diagram of isotherms constructed using two sets of meteorological stations

Изолинии равных температур (изотермы), построенные по данным разных метеорологических станций, в общем совпадают. Низкая расчленённость рельефа приводит к однородности температурного поля. Большое расстояние между станциями компенсируется плавностью изменения температуры.

Температура зависит в первую очередь от глобальных и региональных факторов, таких как географическая широта, циркуляция воздушных масс и сезонные изменения. Благодаря этому она изменяется плавно, без резких перепадов на больших территориях.

Температурные показатели на соседних метеостанциях обычно сильно коррелируют даже на расстоянии 50–100 км. Это позволяет строить изотермы с высокой точностью даже при относительно редкой сети наблюдений.

Измерение температуры производится с высокой точностью, а современные термометры (как электронные, так и традиционные) дают сопоставимые результаты с минимальными систематическими погрешностями.

Поскольку температурное поле изменяется плавно, для его интерполяции успешно применяются даже простые методы, такие как линейная аппроксимация или кригинг. Для осадков же интерполяция требует более сложных подходов, учитывающих рельеф, близость водоёмов и другие локальные факторы, что увеличивает вероятность расхождений между разными наборами данных.

Таким образом, совпадение изотерм при использовании разных источников данных объясняется высокой устойчивостью температурных полей, точностью измерений и эффектив-

ностью методов их интерполяции. В то же время для осадков эти условия не выполняются, что приводит к различиям в построенных изолиниях.

В отличие от температуры, осадки отличаются крайней неоднородностью из-за локальных эффектов: влияния рельефа (орографии), конвективных процессов и особенностей ветровых потоков.

Корреляция атмосферных осадков между станциями может резко снижаться уже на расстоянии 10–20 км, особенно в случаях ливневых дождей, которые часто носят локальный характер.

На точность измерений влияет множество факторов: сила ветра, тип осадкомера (например, обычный ведёрный или автоматический датчик), что может приводить к значительным расхождениям между станциями.

В таблице 5 представлена среднегодовая сумма осадков для водосборов исследуемых рек, полученная по изогиям (рис. 6).

Таблица 5 / Table 5

Среднегодовая сумма осадков для водосборов с карты изогийт (рис. 6)
Average annual precipitation for catchments from the isohyet map (Fig. 6)

Водосбор реки	Среднегодовая сумма осадков, мм	
	данные по метеостанциям УГМС	данные по метеостанциям с meteo.ru
Надым	222	230
Пур	221	248
Пяку-Пур	228	241
Таз	200	242



Рис. 6. Схема изогийт, построенных по двум наборам метеорологических станций

Fig. 6. Scheme of isohyets constructed using two sets of meteorological stations

Анализируя таблицу 5, можно сделать следующие выводы. Данные о среднегодовом количестве осадков, полученные от УГМС, систематически занижены по сравнению с данными meteo.ru. Эта тенденция прослеживается во всех четырёх рассмотренных речных бассей-

нах. Разница между двумя источниками варьируется от 8 до 42 мм в год, что указывает на существенные расхождения в измерениях. Такое существенное различие обусловлено в данном случае разным набором метеорологических станций для построения изогий. Соответственно, можно сделать вывод о некорректности интерполяции данных по атмосферным осадкам в условиях недостаточного количества метеостанций.

Наиболее значительная разница наблюдается для реки Таз: по данным УГМС, осадки составляют 200 мм, тогда как по meteo.ru – 242 мм, разница 42 мм (около 17% занижения). Схожая ситуация с рекой Пур: УГМС фиксирует 221 мм, а meteo.ru – 248 мм, что на 27 мм ($\approx 11\%$) больше.

Наименее выраженное отличие зафиксировано для реки Надым: показатели УГМС (222 мм) лишь на 8 мм ($\approx 3,5\%$) ниже данных meteo.ru (230 мм). Это говорит о том, что в некоторых случаях расхождения между источниками могут быть незначительными.

Заключение

Проведённое исследование пространственного обобщения данных гидрометеорологической сети для водосборов арктических рек Таз, Пур и Надым позволило выявить ключевые тенденции изменения климатических параметров в регионе. Анализ температурных данных показал значимый положительный тренд, особенно выраженный на станциях Тазовск и Тарко-Сале, где среднегодовая температура увеличивалась на $0,032\text{--}0,033^\circ\text{C}$ в год. Это согласуется с глобальными процессами потепления в Арктике, которые оказывают существенное влияние на гидрологический режим рек и состояние многолетней мерзлоты.

Результаты исследования атмосферных осадков оказались менее однозначными. Наблюдались разнонаправленные изменения: увеличение осадков на одних станциях (например, Тазовск, Тарко-Сале) и их уменьшение на других (Ныда, Янов Стан). Это может быть связано как с локальными климатическими особенностями, так и с изменениями циркуляции воздушных масс. Кроме того, выявлены значительные расхождения в данных между источниками (УГМС и meteo.ru), что подчёркивает необходимость стандартизации методов измерений и сбора информации.

Пространственная интерполяция данных подтвердила, что температурные поля в регионе отличаются высокой устойчивостью, тогда как осадки подвержены значительной локальной изменчивости. Это создаёт дополнительные сложности для моделирования гидрологических процессов и прогнозирования климатических изменений. Учитывая сокращение гидрометеорологической сети в регионе, особую важность приобретают методы дистанционного зондирования и интеграции данных из различных источников.

Полученные результаты имеют практическое значение для планирования адаптационных мер в условиях меняющегося климата, управления водными ресурсами и минимизации антропогенного воздействия на хрупкие арктические экосистемы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение сети наблюдений, углублённый анализ взаимодействия климатических и гидрологических факторов, а также разработку более точных методов интерполяции данных.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н.А. Волкова – разработка концепции исследования, анализ и интерпретация результатов, подготовка и редактирование текста; К.В. Ромашова – сбор данных, анализ результатов; А.М. Голубков – подготовка графического материала. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

N.A. Volkova – development of the study concept, analysis and interpretation of results; preparation and editing of the text; K.V. Romashova – data collection, analysis of results; A.M. Golubkov – preparation of graphic material. All authors read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Муждаба О.В., Штанников А.В., Третьяков М.В. Современное состояние государственной гидрологической сети наблюдений в Арктической зоне РФ // Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен: Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова, Санкт-Петербург, 05–14 октября 2023 года. Санкт-Петербург: ООО «Издательство ВВМ», 2023. С. 380–385.
2. Третьяков М.В., Кузьмичев А.П. Результаты методического руководства гидрологическими наблюдениями в Арктической зоне Российской Федерации в 2022 году // Российские полярные исследования. 2023. № 1(51). С. 33–35.
3. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб., изд. РГГМУ, 2007. 279 с.
4. Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. М.: Стройиздат, 2004. 72 с.
5. Свод правил СП 529.1325800.2023 «Определение основных расчётных гидрологических характеристик». М.: Минстрой России, 2023. 110 с.

REFERENCES

1. Muzhdaba O.V., Shtannikov A.V., Tretyakov M.V. Current state of the state hydrological observation network in the Arctic zone of the Russian Federation. *The Fifth Vinogradov Readings. Hydrology in the Era of Change: Collection of reports of the international scientific conference in memory of the outstanding Russian scientist Yuri Borisovich Vinogradov*, St. Petersburg, October 5–14, 2023. St. Petersburg: ООО "VVM Publishing House", 2023, pp. 380–385.
2. Tretyakov M.V., Kuzmichev A.P. Results of the methodological guidance of hydrological observations in the Arctic zone of the Russian Federation in 2022. *Russian polar research*, 2023, no. 1(51), pp. 33–35.
3. Sikan A.V. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. SPb., publ. RSHU, 2007. 279 p.
4. Code of Practice SP 33-101-2003. Definition of the main calculated hydrological characteristics. M.: Stroyizdat, 2004. 72 p.
5. Code of Practice SP 529.1325800.2023 "Definition of the main calculated hydrological characteristics". M.: Ministry of Construction of Russia, 2023. 110 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Волкова Надежда Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры водно-технических изысканий, Российский государственный гидрометеорологический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация); старший научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург, Российская Федерация),

✉ na_san@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9272-4713>

Nadezhda A. Volkova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Engineering Surveys of the Russian State Hydrometeorological University (Saint-Petersburg, Russian Federation), Senior Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (Saint-Petersburg, Russian Federation).

Ромашова Ксения Владимировна – научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург, Российская Федерация),

✉ hydrology2@aari.ru

Ksenia V. Romashova, Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (Saint-Petersburg, Russian Federation).

Голубков Андрей Михайлович – инженер, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург, Российская Федерация),

✉ hydrology2@aari.ru

Andrey M. Golubkov, engineer, Arctic and Antarctic Research Institute (Saint-Petersburg, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 20.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 03.06.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ
И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Научная статья

УДК 624.21/.8

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/169-182>**Метод прогнозирования усилий
в железобетонных пролётных строениях мостовых сооружений
при их проектировании и эксплуатации****Глеб Леонидович Огурцов[✉], Николай Алексеевич Ермошин**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация,[✉] ogurtsov_gl@spbstu.ru

Аннотация. Существующие методы и методики по оценке напряжённно-деформированного состояния пролётного строения основаны на моделировании воздействия нормативных нагрузок АК и НК. При этом не учитывается изменение фактического состава, интенсивности и весогабаритных характеристик транспортного потока на многолетнюю перспективу. Нестационарный, стохастический характер динамики весогабаритных и скоростных характеристик транспортного потока, неопределённость параметров состава и интенсивности движения, воздействие агрессивных факторов внешней среды на конструкционные материалы пролётных строений требуют совершенствования методов прогнозирования долговечности и безотказности их главных балок.

Целью исследования является разработка методологического подхода по оценке показателей долговечности и безотказности балок пролётных строений железобетонных мостовых сооружений в процессе эксплуатации. Предложенный методологический подход основан на применении математического аппарата строительной механики для расчёта напряжённно-деформированного состояния балок пролётного строения, имитационного моделирования их работы, математической теории надёжности и теории транспортных потоков.

Полученные функции плотности распределения времени наработки на отказ балок пролётного строения позволяют прогнозировать возникающие в них усилия, показатели их безотказности и долговечности, а также разрабатывать конструктивно-технологические решения по повышению надёжности работы при проектировании и принимать превентивные меры по предотвращению аварий во время эксплуатации мостовых сооружений.

Ключевые слова: транспортное строительство, безотказность, долговечность, пролётное строение, мостовое сооружение, подвижные нагрузки

Для цитирования: Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А. Метод прогнозирования усилий в железобетонных пролётных строениях мостовых сооружений при их проектировании и эксплуатации // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 169–182.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRFIELDS, BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS

Original article

**The method for predicting forces in reinforced concrete superstructures
of bridge structures during their design and operation****Gleb L. Ogurtsov[✉], Nikolay A. Yermoshin**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation,[✉] ogurtsov_gl@spbstu.ru

© Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А., 2025

Abstract. The existing methods and techniques for assessing the stress-strain state of the superstructure are based on modeling the effects of regulatory loads AK and NK. This does not take into account changes in the actual composition, intensity, and weight and size characteristics of the traffic flow over the long term. The unsteady, stochastic nature of the dynamics of the weight, size and speed characteristics of the traffic flow, the uncertainty of the parameters of the composition and intensity of traffic, the impact of aggressive environmental factors on the structural materials of superstructures require improved methods for predicting the durability and reliability of their main beams.

The purpose of the study is to develop a methodological approach to assess the durability and reliability of beams of superstructures of reinforced concrete bridge structures during operation. The proposed methodological approach is based on the application of mathematical apparatus of structural mechanics to calculate the stress-strain state of superstructure beams, simulation modeling of their operation, mathematical theory of reliability and theory of traffic flows.

The obtained functions of the time distribution density for the failure of superstructure beams make it possible to predict the forces that arise in them, their reliability and durability, as well as to develop design and technological solutions to improve the reliability of work during design and to take preventive measures to prevent accidents during the operation of bridge structures.

Keywords: transport construction, reliability, durability, superstructure, bridge structure, mobile loads

For citation: Ogurtsov G.L., Yermoshin N.A. The method for predicting forces in reinforced concrete superstructures of bridge structures during their design and operation. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 169–182. (In Russ.).

Введение

Состояние работоспособности балок пролётного строения мостового сооружения является определяющим фактором обеспечения его безотказности и безопасности [1]. Неработоспособное состояние или полный отказ балки пролётного строения может наступить в том случае, когда усилия, вызванные внешними нагрузками, превышают её несущую способность, которая снижается из-за износа. В целях повышения безопасности работы мостовых сооружений необходимы достоверные методы прогнозирования и оценки безотказности балок пролётных строений мостов.

Вероятность отказа балки увеличивается в зависимости от продолжительности эксплуатации, интенсивности и состава транспортного потока, а также воздействия агрессивных сред. Кроме этого, несущая способность балки пролётного строения зависит от стабильности и точности технологических процессов изготовления, качества конструкционных материалов. Стохастический и нестационарный характер параметров транспортного потока [2, 3] и внешних воздействий на балки пролётного строения приводит к тому, что возникающие в них усилия являются случайными величинами [4, 5]. В связи с этим вероятность отказа балки может быть установлена на основе следующих предположений.

Вероятность возникновения усилия $\tilde{M}_{i(t)}$, вызванного внешними нагрузками, и вероятность обеспечения несущей способности $\tilde{M}_{ult,i(t)}$ балки пролётного строения в момент времени t образуют группу независимых событий. Таким образом, вероятность отказа балки пролётного строения $P(\tilde{M}_{i(t)} > \tilde{M}_{ult,i(t)})$ в момент времени t вследствие превышения усилия над несущей способностью определяется по формуле (1):

$$P(\tilde{M}_{i(t)} > \tilde{M}_{ult,i(t)}) = P(\tilde{M}_{i(t)}) \cdot P(\tilde{M}_{ult,i(t)}), \quad \text{при } \tilde{M}_{i(t)} > \tilde{M}_{ult,i(t)}. \quad (1)$$

При проектировании и эксплуатации мостовых сооружений определение усилий, вызванных транспортными средствами, выполняется для нормативных нагрузок АК и НК [6–8]. В соответствии с требованиями СП 35.13330.2011 и ГОСТ 32960–2014 применение нагрузки АК и НК на всех стадиях жизненного цикла мостового сооружения не зависит от транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильной дороги, длины пролётного строения и его конструктивных особенностей [9]. Вследствие этого невозможно установление взаимосвязи между величинами усилий, вызванных существующим транспортным потоком и нагрузками АК и НК. Таким образом, на основании ретроспективных и прогнозных данных об интенсив-

ности и составе транспортного потока невозможно прогнозировать величину усилий, создающихся в конструктивных элементах в течение срока службы пролётного строения от нагрузок АК и НК.

В исследованиях [10–12] отмечается ежегодное увеличение объёмов грузооборота на территории РФ, что, в свою очередь, способствует повышению уровня допустимой нагрузки на ось транспортных средств^{24,25}. Рост объёмов грузоперевозок и стоимости топлива приводит к нарушению требований по допустимой нагрузке [13]. В условиях развития экономики страны производится пересмотр требований по допустимым нагрузкам на ось. На основании анализа состава транспортного потока [14, 15] выявлена тенденция увеличения нагрузки на ось транспортных средств на 0,3% ежегодно.

Таким образом, в процессе эксплуатации возможно наступление события, когда все параметры материалов, технологии изготовления, воздействия нагрузок и агрессивных сред оказываются в пределах нормы, но на уровне допустимых «минимальных» в заданном нормативным документом интервале, а не средних (нормативных) значений. В таком случае может наступить преждевременный отказ балки, вероятность которого требуется определить. Не менее важным показателем безотказности в данном случае может быть время работы до отказа балки в конкретных условиях её работы с учётом роста усилия в конструктивных элементах пролётного строения. Естественно, это время является случайной величиной [16, 17]. Прогнозирование усилий должно выполняться на основе данных о реальных значениях весогабаритных характеристик транспортного потока, загруженности участка автомобильной дороги, состава и интенсивности движения транспортных средств, а также учитывать конструктивные особенности пролётного строения в течение расчётного срока службы. Поэтому важнейшей задачей является выявление закона распределения времени работы до отказа балки для поиска практических мероприятий по обеспечению требуемой безотказности.

Материалы и методы

Результирующее усилие в i -ом конструктивном элементе пролётного строения определяется по формуле (2):

$$\tilde{M}_i = \tilde{M}_{y,i} + \tilde{M}_{sw,i} + \tilde{M}_{p,i}, \quad (2)$$

где $\tilde{M}_{y,i}$ – случайная величина усилия, вызванного транспортными средствами, кНм;

$\tilde{M}_{sw,i}$ – случайная величина усилия от собственного веса, кНм;

$\tilde{M}_{p,i}$ – случайная величина усилия от веса мостового полотна, кНм.

Величина усилий, вызванных транспортными средствами, может быть рассчитана исходя из их расположения на пролётном строении, весогабаритных параметров, интенсивности и состава движения [18]. При этом данные характеристики имеют стохастический характер, законы распределения которых необходимо установить [17, 19]. Общая масса транспортного средства зависит от характеристик, устанавливаемых заводом-изготовителем, которые включают массу автомобиля и массу перевозимого груза при соблюдении требований^{1,2}. Возможно предположить, что масса транспортного средства подчиняется нормальному закону распределения, превышение которой от среднего значения допускается не более чем на 10%. Распределение массы осуществляется в соответствии с расчётными схемами [14] и равномерно для колёс, расположенных на одной оси транспортного средства. Увеличение массы транспортного средства на протяжении срока службы пролётного строения предлагается определять по формуле (3):

$$P_{j(t)} = P_{j,0} \left(1 + \frac{\beta}{100} \right)^{t-1}, \quad (3)$$

²⁴ Постановление Правительства России от 01 декабря 2023 г. № 2060 «Об утверждении Правил движения тяжеловесного и (или) крупногабаритного транспортного средства».

²⁵ Федеральный закон «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 08.11.2007 № 257-ФЗ.

где $P_{j,0}$ – исходная масса транспортного средства, т;
 β – процент ежегодного увеличения массы, %;
 t – время эксплуатации пролётного строения, года.

Для учёта конструктивных особенностей и совместной работы балок пролётного строения вычисление усилий предлагается проводить по поверхностям влияния φ_i . Поверхность влияния представляет собой функцию изменения возникающего усилия в определённом сечении i -ого конструктивного элемента в зависимости от координаты приложения нагрузки. Выявление поверхности влияния для i -ого конструктивного элемента проводится методом статического моделирования для сечения, имеющего максимальные усилия. Тогда усилия $\tilde{M}_{y,i}$, создающиеся в i -ой балке пролётного строения от r -ого колеса j -ой подвижной нагрузки, вычисляются в зависимости от его точки приложения в заданной системе координат в продольном X_{rj} и поперечном Y_{rj} направлениях (рис. 1).

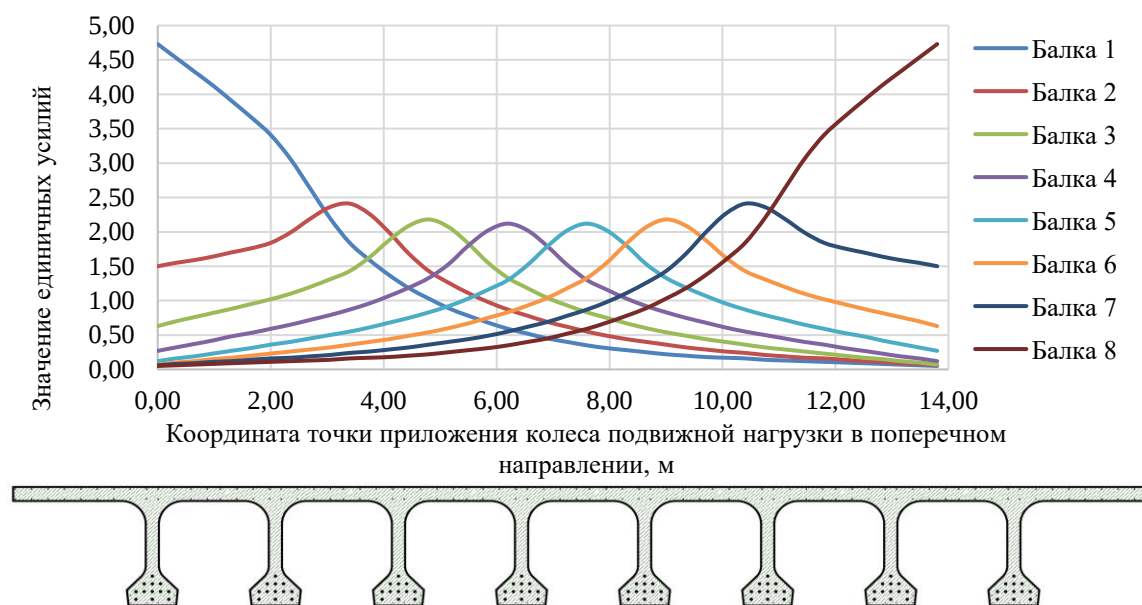


Рис. 1. Линии влияния для определения изгибающего момента $\tilde{M}_{yi}$ в зависимости от расположения транспортного средства на пролётном строении
 Fig. 1. Influence lines for determining the bending moment $\tilde{M}_{yi}$ depending on the location of the vehicle on the superstructure

Усилие $\tilde{M}_{y,i}$, возникающие в i -ой балке пролётного строения от k -ого количества расчётных автомобилей, расположенных на пролётном строении, определяется по формуле (4):

$$\tilde{M}_{y,i} = \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^d [\tilde{P}_{rj} \cdot \varphi_i(X_{rj}, Y_{rj})], \quad (4)$$

где $\tilde{P}_{rj}$ – случайная величина нагрузки на r -ое колесо, кН, определяемая как половина нагрузки от d -ой оси j -ого расчётного автомобиля.

Координаты приложения колеса устанавливаются из расчётных схем транспортных средств: длины, ширины, расстояния между осями и расположением в полосе движения. По длине пролётного строения автомобили располагаются на дистанции, достаточной для применения торможения, то есть на расстоянии, равном полному остановочному пути [20–21]. Максимальные усилия в конструктивных элементах пролётного строения достигаются при минимальных расстояниях между автомобилями, что соответствует образованию затора. В таком случае расстояние между расчётными автомобилями принимается равным 1,0 метру. При проектировании автомобильной дороги её пропускная способность определяется с учётом прироста интенсивности движения и дальнейшего развития транспортной сети на последний год эксплуатации. Таким образом, в результате увеличения интенсивности движения происходит снижение коэффициента обеспеченности пропускной способности автомобильной дороги в

течение эксплуатации, что приводит к образованию заторов. До этого момента расстояние между расчётными автомобилями можно принять равным длине остановочного пути, величина которого зависит от скорости движения и определяется по формуле (5) [20–21]:

$$S_0 = (t_1 + t_2 + 0,5 \cdot t_3) \cdot \frac{V_a}{3,6} + \frac{V_a^2}{25,92 \cdot \alpha}, \quad (5)$$

где t_1 – время реакции водителя, сек.;
 t_2 – время запаздывания срабатывания тормозного привода, сек.;
 t_3 – время нарастания замедления при торможении, сек.;
 α – замедление при экстренном торможении, м/сек.²;
 V_a – скорость движения на участке автомобильной дороги, км/ч, определяемая по формуле (6):

$$V_a = V_{max} \ln \left(\frac{1}{1 - k_{int(t)}} \right), \quad (6)$$

где V_{max} – максимально допустимая скорость движения автомобилей, км/ч;
 $k_{int(t)}$ – коэффициент обеспеченности пропускной способности автомобильной дороги [23] в момент времени t , д. ед., который устанавливается на основании ретроспективного анализа развития улично-дорожной сети.

Значение максимальных усилий также зависит от расположения автомобилей по длине пролётного строения [24]. Такие усилия возникают при расположении автомобилей в центре пролёта. Для моделирования транспортных потоков на мостовом сооружении рационально использовать модель следования за лидером (рис. 2), где координата в продольном направлении лидера потока n_N в полосе N определяется по неблагоприятному расположению, а появление лидера в данной точке подчиняется закону распределения Бернулли.

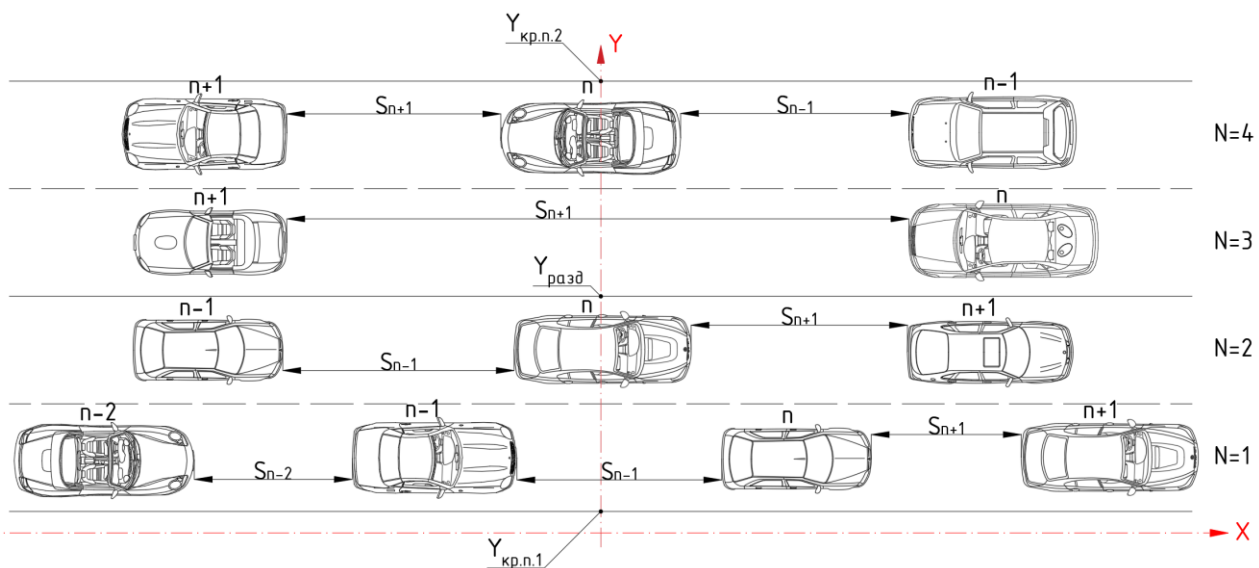


Рис. 2. Графическая модель транспортного потока на мостовом сооружении

Fig. 2. Graphical model of the traffic flow on the bridge structure

При отсутствии автомобиля в точке возникновения максимальных усилий X_{max} считается, что автомобиль располагается на интервале, равном суммарной длине остановочного пути и средней длине автомобиля. Координата в продольном направлении X_j лидера потока определяется по условию (7):

$$X_j = \begin{cases} X_{max} & \text{при } P_n = 1 \\ X_{max} - l_{cp} - S_0 \leq X_j \leq X_{max} + l_{cp} + S_0 & \text{при } P_n = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где P_n – вероятность появления лидера потока в центре пролёта.

Координаты других расчётных автомобилей в полосе движения определяются относительно координаты лидера так, чтобы расстояние между ними было достаточным для осуществления торможения. Расположение транспортного средства в поперечном профиле мостового сооружения зависит от схемы движения, реализуемой применением технических средств организации дорожного движения. Анализ следования автомобилей по полосе [25] показал, что при следовании автомобиля по полосе водителями ненамеренно осуществляется смещение в поперечном направлении относительно осевой линии на 0,5 метра. Величину координаты в поперечном направлении Y_j расчётного автомобиля в полосе допустимо принять как случайную нормально распределённую, приняв за математическое ожидание геометрический центр полосы, а за стандартное отклонение – треть от смещения, равного 0,5 метра.

Для моделирования типа транспортного средства в составе потока необходимо установить функцию распределения вероятности его появления. Вероятность появления j -ого транспортного средства с интенсивностью N_j при известной суммарной интенсивности потока N_{sum} соответствует дискретному равномерному закону распределения и определяется по формуле (8):

$$P_j = \frac{N_j}{N_{sum}}. \quad (8)$$

Величина интенсивности движения изменяется в течение эксплуатации, что приводит к изменению вероятности появления. Интенсивность движения типа транспортного средства на момент времени t вычисляется по формуле (9):

$$N_{j(t)} = N_{j,0} \left(1 + \frac{q}{100}\right)^{t-1}, \quad (9)$$

где $N_{j,0}$ – исходная интенсивность движения, авт./сут;
 q – процент ежегодного прироста интенсивности, %.

Усилия, вызванные нагрузками от собственного веса конструктивного элемента и мостового полотна, вычисляются с помощью приведения равномерно распределённой нагрузки по длине элемента к узловым. Полученные результирующие узловые нагрузки формируют вектор внешних сил, что позволяет проводить вычисление усилий при использовании поверхности влияния по координатам узлов X_u и Y_u по формуле (10) – для вычисления усилий от собственного веса конструктивного элемента и формуле (11) – для собственного веса мостового полотна:

$$\tilde{M}_{sw,i} = \sum_{u=1}^s \sum_{e=1}^g 0,5 \cdot \tilde{\gamma}_e \cdot l_e \cdot \varphi_i(X_u, Y_u), \quad (10)$$

$$\tilde{M}_{p,i} = \sum_{u=1}^s \sum_{e=1}^g 0,5 \cdot \tilde{\gamma}_p \cdot l_e \cdot b_e \cdot \varphi_i(X_u, Y_u), \quad (11)$$

где $\tilde{\gamma}_e$ – случайная величина удельного веса e -ого конструктивного элемента (балки), представленная в виде равномерно распределённой нагрузки по его длине, кН/м;
 l_e и b_e – длина и грузовая ширина конструктивного элемента, м;
 $\tilde{\gamma}_p$ – удельный вес мостового полотна, представленный в виде равномерно распределённой нагрузки по длине конечного элемента, кН/м, величина которого определяется по формуле (12):

$$\tilde{\gamma}_p = \sum_{m=1}^f \tilde{\gamma}_m \cdot \tilde{h}_m, \quad (12)$$

где $\tilde{\gamma}_m$ и $\tilde{h}_m$ – случайные величины собственного веса, кН/м³, и высота m -ого конструктивного слоя, м.

Величины, характеризующие собственный вес конструктивных элементов и слоёв мостового полотна, а также их высоты, возможно принять подчинёнными нормальному закону распределения с допусками 5% по весу и 15% по высоте слоя в соответствии с СП 35.13330.2011 и ГОСТ Р 59120-2021 соответственно.

На основе выявленных математических зависимостей представляется возможным определить усилия, возникающие в конструктивном элементе в момент времени t . Установление аналитической функции закона распределения усилий проводилось с помощью имитационной модели, блок-схема которой представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Блок-схема имитационной модели работы главной балки пролётного строения

Fig. 3. Block diagram of the simulation model of the main beam of the superstructure

Алгоритм моделирования заключается в выполнении следующих процедур. В «Блок 1» вводятся значения входных параметров транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильной дороги, а также интервалы их варьирования. Для данных значений вычисляются основные характеристики распределений, такие как математическое ожидание M и дисперсия D , на основании которых определяются вид функции закона распределения и параметры формы. В «Блоке 2» методом обратных функций выполняется имитация значений входных параметров по выявленным законам распределения. Работа «Блока 3» заключается в вычислении значения усилия в конструктивном элементе (балке) пролётного строения по выявленным математическим зависимостям для различных комбинаций. В «Блоке 4» моделируются усилия в конструктивных элементах для каждого дискретного приращения времени. «Блок 5» предназначен для определения требуемого количества прогонов модели K на основании статистических характеристик данных для каждого момента времени до обеспечения заданного уровня доверительной вероятности. «Блок 6» интерпретирует результаты имитационного моделирования для каждого момента времени в целях получения аналитической функции закона распределения усилий в конструктивном элементе (балке).

Результаты исследования

Реализация результатов исследования выполнялась для разрезной системы пролётного строения, состоящей из 8 железобетонных балок. Собственный вес балки пролётного строения имеет математическое ожидание, равное 16,75 кН/м. Входные параметры, используемые для моделирования усилия от собственного веса мостового полотна, представлены в таблице 1.

Расчётные схемы транспортных средств приняты в соответствии с [20]. Интенсивности их движения и схемы распределения массы по осям представлены в таблице 2.

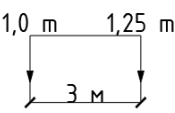
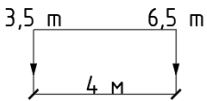
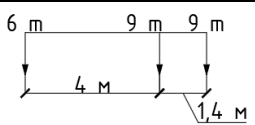
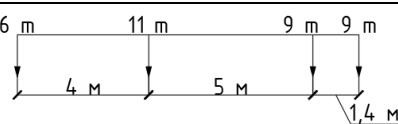
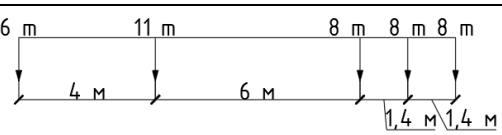
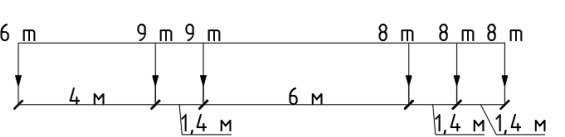
Таблица 1 / Table 1

Конструкция мостового полотна
Bridge deck structured system

№ п/п	Наименование слоя	Удельный вес, кН/м ³	Высота, см
1	Асфальтобетонное покрытие 1	27	5,0
2	Асфальтобетонное покрытие 2	27	5,0
3	Защитный слой	25	4,0
4	Гидроизоляция	11	0,5
5	Выравнивающий слой	25	3,0

Таблица 2 / Table 2

Состав и интенсивность движения транспортных средств
Composition and intensity of traffic of vehicles

Тип ТС	Наименование схемы	Расчётная схема условного автомобиля	Интенсивность движения, авт./сут.
1	Легковой автомобиль		3000
2	Двухосный автомобиль		500
3	Трёхосный автомобиль		300
4	Четырёхосный автомобиль		200
5	Пятиосный автомобиль		50
6	Шестиосный автомобиль		25

Процент ежегодного увеличения массы для всех типов транспортных средств принят равным 0,3%. Прирост интенсивности движения для 1-го типа транспортных средств принят равным 3,0%, для 2-го и 3-го – 4,0%, для 4-го, 5-го и 6-го – 5,0%.

При проектировании принято, что расчётная максимальная скорость движения автомобилей составляет 110 км/ч. На основании анализа развития транспортной сети прогнозируется, что коэффициент обеспеченности пропускной способности в течение срока эксплуатации мостового сооружения (рис. 4) определяется по формуле (13):

$$k_{int(t)} = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (13)$$

где λ – интенсивность изменения пропускной способности, д. ед., равное 0,04.

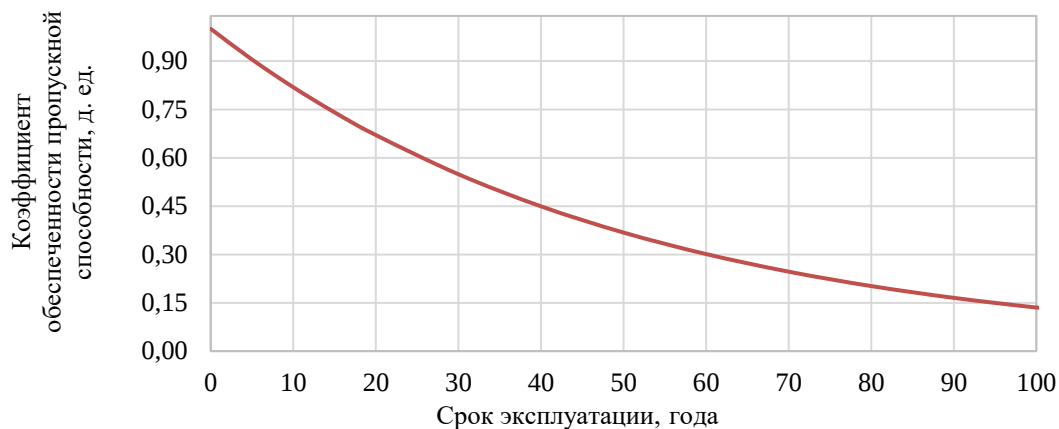


Рис. 4. Коэффициент обеспеченности пропускной способности в течение срока эксплуатации мостового сооружения

Fig. 4. The coefficient of capacity availability during the life of the bridge structure

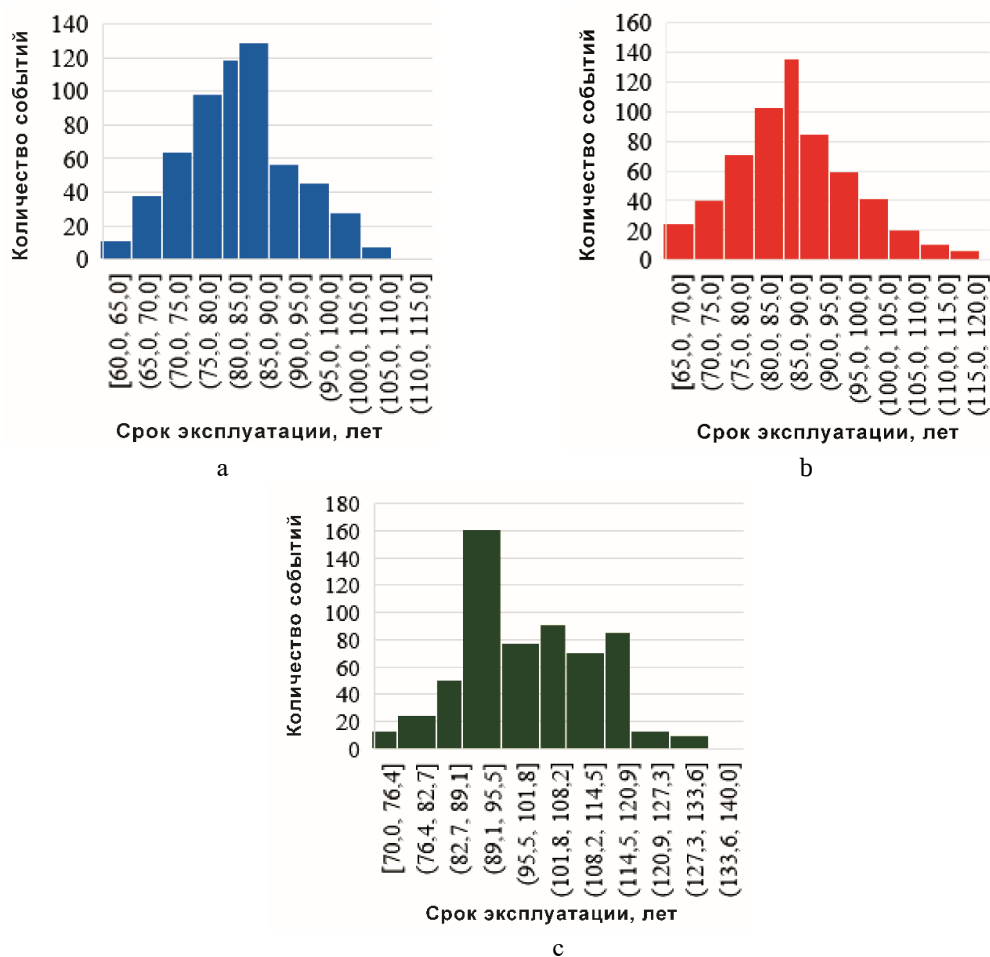


Рис. 5. Гистограмма частот времени наработки на отказ:

а) по прогибу (среднее время $\bar{T} = 85,52$ года $\sigma_T = 10,39$);

б) по ширине раскрытия трещин (среднее время $\bar{T} = 89,30$ года $\sigma_T = 11,02$);

в) по несущей способности (среднее время $\bar{T} = 100,39$ года $\sigma_T = 12,62$)

Fig. 5. Histogram of failure time frequencies: а) by deflection (average time $\bar{T} = 85,52$ years $\sigma_T = 10,39$); б) by crack opening width (average time $\bar{T} = 89,30$ years $\sigma_T = 11,02$); в) by bearing capacity (average time $\bar{T} = 100,39$ years $\sigma_T = 12,62$)

Анализ результатов имитационного моделирования позволяет сделать вывод, что усилия в балке пролётного строения подчиняется нормальному закону распределения для любого

момента времени t . На стадии проектирования установлено, что при достижении расчётного значения усилия, равного 6473,51 кНм, наступает отказ балки по прогибу, при значении 6683,01 кНм – по ширине раскрытия трещин, а при значении 7154,55 кНм – по несущей способности. На основании проведённого имитационного моделирования возможно определить вероятность и время наступления отказа балки пролётного строения (рис. 5).

Результаты имитационного моделирования подтверждают гипотезу о том, что время наработки на отказ подчиняется нормальному закону распределения. Математические ожидания времени наработки на отказ по прогибу составляет 85 лет 190 дней; ширине раскрытия трещин – 89 лет 110 дней и несущей способности – 100 лет 142 дня. Отказы происходят вследствие достижения значения коэффициента обеспеченности пропускной способности автомобильной дороги, равного 0,09.

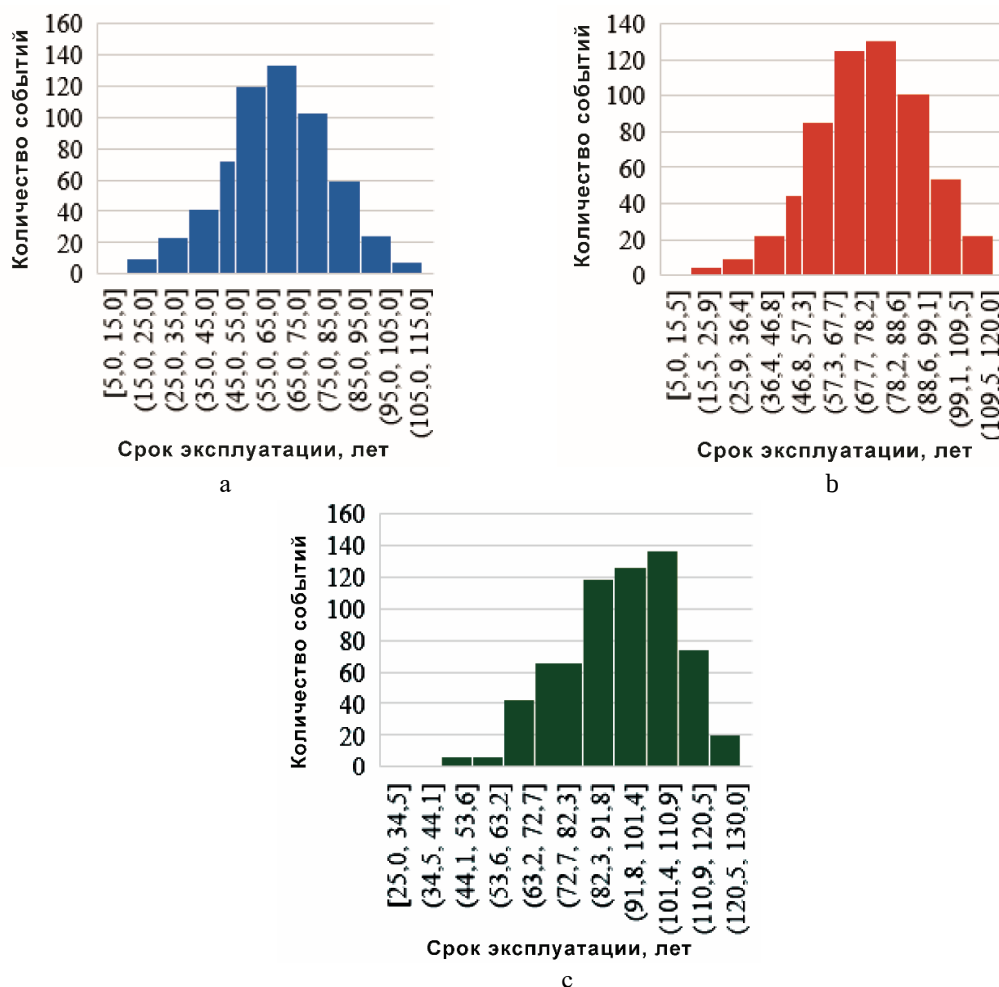


Рис. 6. Гистограмма частот времени наработки на отказ:

а) по прогибу (среднее время $\bar{T} = 69,24$ года $\sigma_T = 18,49$);

б) по ширине раскрытия трещин (среднее время $\bar{T} = 76,76$ года $\sigma_T = 18,57$);

в) по несущей способности (среднее время $\bar{T} = 95,30$ года $\sigma_T = 17,03$)

Fig. 6. Histogram of failure time frequencies:

a) by deflection (average time $\bar{T} = 69,24$ years $\sigma_T = 18,49$);

b) by crack opening width (average time $\bar{T} = 76,76$ years $\sigma_T = 18,57$);

c) by bearing capacity (average time $\bar{T} = 95,30$ years $\sigma_T = 17,03$)

В случае когда прирост интенсивности движения становится равным 2%, математические ожидания времени наработки на отказ по прогибу, ширине раскрытия трещин и несущей способности принимают значения 123 года 186 дней, 127 лет 9 дней и 135 лет 91 день соответственно. Следовательно, математические ожидания времени наработки на отказ зависят от ко-

эффициента обеспеченности пропускной способности автомобильной дороги и допустимой нагрузки на ось автомобиля. Повышение долговечности и безотказности пролётного строения представляется возможным при выполнении мероприятий по ограничению весогабаритных параметров транспортных средств и повышению пропускной способности. Данные мероприятия следует вводить на 60-м году при приросте интенсивности движения 4%. При двухпроцентном приросте интенсивности проведение данных мероприятий не требуется.

Представляет особый интерес выявление времени наработки на отказ для случая не обеспечения пропускной способности, когда коэффициент обеспеченности пропускной способности стремится к нулю. На основании имитационного моделирования получены гистограммы частот времени наработки на отказ (рис. 6).

При образовании заторов математические ожидания времени наработки на отказ равны: 69 лет 88 дней – по прогибу, 76 лет 278 дней – по ширине раскрытия трещин и 95 лет 110 дней – по несущей способности. В данном случае необходимо применять мероприятия по ограничению весогабаритных параметров транспортных средств на 25-м году эксплуатации. Таким образом, для обеспечения требуемого уровня безотказности и долговечности пролётного строения существует необходимость в проведении мероприятий, способствующих повышению коэффициента обеспеченности пропускной способности в течение срока службы.

Заключение

Предложенный метод позволяет прогнозировать безотказность и долговечность конструктивных элементов пролётного строения для различных уровней обеспечения пропускной способности участка автомобильной дороги и определять требуемые мероприятия по их повышению при проектировании и эксплуатации.

Апробация метода и входящей в его состав имитационной модели выполнена для балки пролётного строения разрезной системы. Установлено, что для обеспечения требуемого уровня безотказности и долговечности пролётного строения необходимо предпринимать следующие мероприятия: обеспечение пропускной способности – отсутствие образования заторов на мостовом сооружении и снижение коэффициента обеспеченности пропускной способности до 0,09; повышение максимально допустимой скорости движения на участке автомобильной дороги; введение ограничений по весогабаритным характеристикам транспортных средств при невозможности обеспечить пропускную способность.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Г.Л. Огурцов – разработка имитационной и математической моделей, вывод формул; Н.А. Ермошин – постановка задачи, научное руководство работой.

G.L. Ogurtsov – development of an imitation and mathematical models, derivation of formulas; N.A. Yermoshin – problem statement, scientific guidance of the work. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитриев А.А. Причины разрушения мостовых сооружений // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства. 2021. С. 117–118.
2. Саламахин П.М. Обоснование нормативных временных вертикальных нагрузок на автодорожные мостовые сооружения и автомобильные дороги РФ // Наука и техника в дорожной отрасли. 2020. № 1. С. 36–40.
3. Смоляго Г.А., Луценко А.Н., Дрокин С.В. К оценке живучести каркасных конструктивных систем из монолитного железобетона с учётом дефектов изготовления и монтажа // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2010. № 2. С. 80–83.

4. Саламахин П.М. Концепция формирования нормативных и расчётных вертикальных временных нагрузок на автодорожные и городские мостовые сооружения Российской Федерации // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2015. № 3. С. 69–73.
5. Скворцов О.В. Анализ действующих норм // Автомобильные дороги. 2015. № 5. С. 54–57.
6. Нигаматова О.И., Смердов Д.Н. К вопросу оценки технического состояния автодорожных мостовых сооружений // Инновационный транспорт. 2013. № 4. С. 31–36.
7. Белый А.А., Карапетов Э.С., Цыганкова Е.С. Эволюция транспортных нагрузок для расчёта железобетонных мостовых сооружений на примере Санкт-Петербурга // Транспортное строительство. 2017. № 12. С. 21–24.
8. Антоненко М.В., Иванкина О.П. Расчёт мостовых сооружений на действие подвижной нагрузки // Новые технологии в учебном процессе и производстве. 2020. С. 153–155.
9. Саламахин П.М. Проблемы, вызывающие необходимость замены нормативных временных нагрузок АК для автодорожных мостовых сооружений // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2010. № 33. С. 232–239.
10. Жежеря Е.А., Кирова И.В., Попова Т.Л. Анализ динамики российского рынка грузоперевозок (2004–2013 гг.) // Экономика и социум. 2015. № 1–3 (14). С. 93–98.
11. Амелин С.С. Анализ динамики российского рынка грузоперевозок (2000–2017 гг.) // Экономика и социум. 2018. № 10 (53). С. 124–129.
12. Лобанова Т.М., Пузанова Т.В. Тенденции и проблемы развития грузоперевозок в регионе // Вестник Белорусско-Российского университета. 2022. № 4 (77). С. 92–101.
13. Тропынина Н.Е., Куликова О.М., Аксенова В.К. Анализ рынка грузоперевозок в России // Журнал прикладных исследований. 2023. № 3. С. 115–123.
14. Васильев А.И. Деградационные процессы и остаточный ресурс долговечности мостовых элементов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. № 1 (23). С. 1.
15. Дуйшеев С.Д., Маткеримов Т.Ы., Атамкулов У.Т. Совершенствование организации пропуска крупногабаритных и тяжеловесных транспортных средств по автомобильным дорогам // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2013. № 29. С. 116.
16. Ventura R., Barabino B., Maternini G. Prediction of the severity of exceeding design traffic loads on highway bridges // Heliyon. 2024. Т. 10. № 1. С. 23374.
17. Yu Y., Cai C. S. Prediction of extreme traffic load effects of bridges using Bayesian method and application to bridge condition assessment // Journal of Bridge Engineering. 2019. Т. 24. № 3. С. 04019003.
18. Полярус О.В., Барчан В.В. Модель транспортного потока по мосту как основа определения допустимой нагрузки на мост для выполнения требований охраны труда // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету. 2012. № 59. С. 214–218.
19. Dan D. et al. A digital twin model of traffic flow load for full bridge deck geared to analysis of bridge mechanical effects under statistical steady state // Structures. Elsevier, 2025. Т. 73. С. 108299.
20. Мохнев В.А. Теоретический анализ вероятностных характеристик длины остановочного пути автомобиля // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 1. С. 41–46.
21. Сидоров Б.А., Карев Б.Н. Влияние точности оценки величин параметров экстренного торможения автомобиля на выводы экспертов-автотехников // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 97–101.
22. Подопригора Н.В. Совершенствование методики определения тормозных параметров при реконструкциях и экспертизах ДТП // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 6. С. 143–150.
23. Ермошин Н.А., Букатов Д.С. Имитационная модель определения эксплуатационных показателей военно-автомобильных дорог // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. 2019. № 3. С. 104–109.
24. Wang X. et al. Probabilistic modeling of congested traffic scenarios on long-span bridges // Applied Sciences. 2024. Т. 14. № 20. С. 9525.
25. Страхова Д.А., Грешников А.А. Допустимые параметры ширины полос движения на автомагистралях в Российской Федерации // Дороги и мосты. 2018. № 2. С. 64–74.

REFERENCES

1. Dmitriev A.A. The causes of the destruction of bridge structures. *Traditions, Modern Problems and Prospects of Construction Development*, 2021, pp. 117–118.

2. Salamakhin P.M. Substantiation of normative temporary vertical loads on highway bridge structures and highways of the Russian Federation. *Science and Technology in the Road Industry*, 2020, no. 1, pp. 36–40.
3. Smolyago G.A., Lutsenko A.N., Drokin S.V. Assessment of the survivability of frame structural systems made of monolithic reinforced concrete, taking into account manufacturing and installation defects. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2010, no. 2, pp. 80–83.
4. Salamakhin P.M. The concept of formation of normative and calculated vertical temporary loads on road and urban bridge structures of the Russian Federation. *Bulletin of the Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI)*, 2015, no. 3, pp. 69–73.
5. Skvortsov O.V. Analysis of current regulations. *Highways*, 2015, no. 5, pp. 54–57.
6. Nigmatova O.I., Smerdov D.N. On the issue of assessing the technical condition of road bridge structures. *Innovative Transport*, 2013, no. 4, pp. 31–36.
7. Bely A.A., Karapetov E.S., Tsygankova E.S. Evolution of transport loads for calculation of reinforced concrete bridge structures on the example of St. Petersburg. *Transport Construction*, 2017, no. 12, pp. 21–24.
8. Antonenko M.V., Ivankina O.P. Calculation of bridge structures for the effect of a moving load. *New Technologies in the Educational Process and Production*, 2020, pp. 153–155.
9. Salamakhin P.M. Problems causing the need to replace the standard temporary loads of AK for road bridge structures. *Science and Progress of Transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 2010, no. 33, pp. 232–239.
10. Zhezherya E.A., Kirova I.V., Popova T.L. Analysis of the dynamics of the Russian cargo transportation market (2004–2013). *Economics and Society*, 2015, no. 1–3 (14), pp. 93–98.
11. Amelin S.S. Analysis of the dynamics of the Russian cargo transportation market (2000–2017). *Economics and Society*, 2018, no. 10 (53), pp. 124–129.
12. Lobanova T.M., Puzanova T.V. Trends and problems of cargo transportation development in the region. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2022, no. 4 (77), pp. 92–101.
13. Tropynina N.E., Kulikova O.M., Aksenova V.K. Cargo transportation market analysis in Russia. *Journal of Applied Research*, 2023, no. 3, pp. 115–123.
14. Vasiliev A.I. Degradation processes and residual durability of bridge elements. *Car. Road. Infrastructure*, 2020, no. 1 (23), p. 1.
15. Duishoev S.D., Matkerimov T.Y., Atamkulov U.T. Improving the organization of passage of large and heavy vehicles on highways. *Izvestiya KSTU named after I. Razzakov*, 2013, no. 29, p. 116.
16. Ventura R., Barabino B., Maternini G. Prediction of the severity of exceeding design traffic loads on highway bridges. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 1, p. 23374.
17. Yu Y., Cai C.S. Prediction of extreme traffic load effects of bridges using Bayesian method and application to bridge condition assessment. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, vol. 24, no. 3, p. 04019003.
18. Polyarus O.V., Barchan V.V. The model of traffic flow on the bridge as the basis for determining the permissible load on the bridge to meet labor protection requirements. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*, 2012, no. 59, pp. 214–218.
19. Dan D. et al. A digital twin model of traffic flow load for full bridge deck geared to analysis of bridge mechanical effects under statistical steady state. *Structures*. Elsevier, 2025, vol. 73, p. 108299.
20. Mokhnev V.A. Theoretical analysis of probabilistic characteristics of the length of the stopping distance of the car. *Technical Regulation in Transport Construction*, 2019, no. 1, pp. 41–46.
21. Sidorov B.A., Karev B.N. The influence of the accuracy of estimating the values of the emergency braking parameters of a car on the conclusions of automotive experts. *Modern Problems of Science and Education*, 2012, no. 5, pp. 97–101.
22. Podoprighora N.V. Improvement of the methodology for determining braking parameters during reconstructions and examinations of accidents. *Bulletin of Civil Engineers*, 2012, no. 6, pp. 143–150.
23. Ermoshin N.A., Bukatov D.S. Simulation model for determining the operational performance of military highways. *Scientific Bulletin of the Volsky Military Institute of Material Support: Military Scientific Journal*, 2019, no. 3, pp. 104–109.
24. Wang X. et al. Probabilistic modeling of congested traffic scenarios on long-span bridges. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 20, p. 9525.
25. Strakhova D.A., Greshnikov A.A. Permissible parameters of lane widths on motorways in the Russian Federation. *Roads and Bridges*, 2018, no. 2, pp. 64–74.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Огурцов Глеб Леонидович – аспирант, ассистент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация),

✉ ogurtsov_gl@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5183-7420>

Gleb L. Ogurtsov, Postgraduate Student, Assistant at the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation).

Ермошин Николай Алексеевич – доктор военных наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация),

✉ ermoshin_na@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0367-5375>

Nikolay A. Yermoshin, Doctor of Military Sciences, Professor at the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 14.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 16.05.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.

Научная статья

УДК 711.73

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/183-201>

Комплексное восстановление связности города путём формирования системы многоуровневых пространств транспортных магистралей

Ульяна Максимовна Смекалина

Дальневосточный федеральный университет,

Владивосток, Российская Федерация

✉ smekalina.um@dvfu.ru

Аннотация. Современные города сталкиваются с проблемой разрыва пространственной связности из-за интенсивного развития транспортной инфраструктуры. Широкие магистрали и развязки, улучшая автомобильную доступность, зачастую становятся барьерами для пешеходов, разрушая целостность городских территорий. В данной статье исследуются приёмы восстановления связности через формирование многоуровневых пространств транспортных магистралей (МПТМ) – архитектурно-планировочных решений, разделяющих транспортные и пешеходные потоки по вертикали. На основе анализа практического опыта и теоретических исследований предложены основные приёмы организации МПТМ: объекты с подземным, полуподземным, наземным и надземным транспортным уровнем. Сформулированы основные приёмы восстановления пространственной связности для различных градостроительных условий – от плотной исторической застройки до прибрежных и природных территорий. Эти решения не только восстанавливают пешеходные связи, но и создают новые общественные пространства, повышая качество городской среды.

Новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к восстановлению связности на разных масштабных уровнях (город, район, улица), продемонстрированной для г. Владивостока. В основу концептуального предложения легли успешные практики восстановления пространственной связности Милана и Сиэтла, где примеры МПТМ были органично интегрированы в единую систему пешеходного каркаса города. Полученные результаты формируют методическую основу для преобразования территорий, разделённых транспортными магистралями, и могут быть применены в других городах со схожими градостроительными условиями.

Ключевые слова: каркас города, связность, планировочная структура, многоуровневые пространства, пешеходная доступность, магистрали, городское планирование

Для цитирования: Смекалина У.М. Комплексное восстановление связности города путём формирования системы многоуровневых пространств транспортных магистралей // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 183–201.

Original article

Comprehensive restoration of urban connectivity through the creation of a system of multi-level highway spaces

Ulyana M. Smekalina

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

✉ smekalina.um@dvfu.ru

Abstract. Contemporary cities face the challenge of disrupted urban connectivity due to the intensive development of transport infrastructure. Wide highways and interchanges, while improving vehicular mobility often become barriers for pedestrians, undermining the integrity of the urban environment. This article explores techniques for restoring connectivity through the creation of multi-level pedestrian spaces – architectural solutions that vertically separate vehicular and pedestrian flows. Based on the analysis of practical experience and theoretical research, the key approaches to organizing multi-level pedestrian spaces are proposed: structures with underground, semi-underground, ground-level, and elevated transport layers. The article outlines primary methods for restoring spatial connectivity in various urban contexts – from dense historical districts to coastal and natural areas. These solutions not only reestablish pedestrian links but also create new public spaces, enhancing the quality of the urban environment.

The novelty of the research lies in developing a comprehensive approach to restoring connectivity at different scales (city, district, street), demonstrated through the case study of Vladivostok. The conceptual proposal is based on successful practices of spatial connectivity restoration in Milan and Seattle, where multi-level pedestrian spaces examples were seamlessly integrated into the city's unified pedestrian framework. The obtained results form a methodological foundation for transforming areas fragmented by transport highways and can be applied in other cities with similar urban conditions.

Keywords: urban network, urban connectivity, planning structure, multilevel spaces, walkability, highways, urban planning

For citation: Smekalina U.M. Comprehensive restoration of urban connectivity through the creation of a system of multi-level highway spaces. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 183–201. (In Russ.).

Введение

Связи выступают универсальным принципом организации окружающих нас процессов. Они не просто соединяют элементы, но и определяют саму возможность существования сложных структур. В биологии связи между клетками в тканях многоклеточных организмов предназначены для межклеточного транспорта веществ и передачи сигналов. В телекоммуникационных системах каналы связи обеспечивают передачу больших объёмов информации. В социологии социальные связи объединяют людей в социальные общности. В русском языке синтаксические связи служат для соединения слов в словосочетания и словосочетаний – в предложения.

В градостроительстве понятие *связность* часто исследуется именно как характеристика развитой транспортной системы. Под транспортной связностью территории понимают степень взаимной доступности улично-дорожной сети, определяемую количеством и удобством пересечений, примыканий и альтернативных маршрутов [1]. Чем выше плотность и вариативность транспортных связей, тем проще жителям перемещаться по городу.

Однако чрезмерный акцент на развитие транспортной инфраструктуры привёл к негативным последствиям для пешеходной среды. Расширение дорожной сети, строительство магистралей и развязок, увеличение пропускной способности улиц – всё это, улучшая транспортную доступность, зачастую разрушает пешеходные связи. Широкие проезжие части, многоуровневые развязки и эстакады превращают улицы в непреодолимые барьеры, вынуждая пешеходов передвигаться длинными и неудобными маршрутами или рисковать, перебегая дорогу в неположенных местах.

В современных городах крупные транспортные артерии, изначально призванные улучшить связность, фактически стали преградами, разрывающими исторически сложившуюся планировочную структуру и изолирующими районы друг от друга. Это привело к пространственной расчленённости городской среды и отсутствию целостной системы общественных пространств и пешеходных связей. Традиционные меры обеспечения пешеходной доступности, такие как реорганизация улиц и устройство наземных переходов, оказываются неэффективными в условиях сложного рельефа и плотной застройки. В то же время альтернативные методы преодоления транспортных барьеров остаются слабо изученными.

Существующие решения по восстановлению связности, как правило, носят точечный характер и ограничиваются локальными мерами – устройством светофоров, наземных или вне-

личных пешеходных переходов в отдельных проблемных местах. На данный момент в отечественной практике не разработан комплексный подход, учитывающий не только транспортные связи, но и систему пешеходных и зелёных пространств. Большинство существующих проектов фокусируются на точечных решениях, игнорируя необходимость восстановления связности на общегородском уровне. Однако в мировой практике для решения проблем несвязности территорий широко используется архитектурное формирование системы транспортно-пешеходных сооружений в границах улично-дорожных пространств.

Цель данного исследования – выявление приёмов архитектурно-пространственной организации системы многоуровневых многофункциональных объектов в зоне транспортной инфраструктуры как метода восстановления пространственной связности и пешеходной доступности на разных масштабных уровнях города и апробация этих приёмов на примере планировочной структуры г. Владивостока. Задачами исследования являются:

1. Исследование понятия связности.
2. Изучение многоуровневых транспортно-пешеходных сооружений как архитектурного метода восстановления городской связности.
3. Выявление основных архитектурно-пространственных приёмов восстановления связности на разных масштабных уровнях города.
4. Применение комплекса предложенных архитектурных решений для восстановления связности в г. Владивостоке.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран г. Владивосток, где уникальный сложный рельеф исторически предопределил развитие транспортной системы. Сочетание транспортных и природных барьеров с плотной застройкой усиливает проблему изолированности городских территорий. Исследование предполагает не только анализ и систематизацию существующих практик, но и разработку новых решений, которые могли бы стать основой для целостной стратегии восстановления связности городского пространства.

Для исследования использованы следующие методы:

1. Систематизация и анализ теоретических источников.
2. Структурно-морфологический анализ, сравнительный анализ, классификация и типизация реализованных отечественных и зарубежных проектов.
3. Выдвижение гипотезы и теоретическое моделирование приёмов архитектурного формирования исследуемых объектов.
4. Экспериментальное проектирование на примере г. Владивостока.

Обсуждение результатов исследования

Теоретические исследования понятия связности

В градостроительстве связность традиционно рассматривается как параметр транспортной инфраструктуры, однако её роль гораздо шире – она отражает социальные, функциональные и пространственные взаимосвязи города. Анализ работ отечественных и зарубежных авторов демонстрирует междисциплинарный подход к изучению понятия связности.

А.Э. Гутнов, исследуя эволюционные факторы структурно-функциональной организации города, сформулировал «каркасно-тканевую» модель градостроительной системы [2]. Градостроительная система определяется как сочетание «каркаса» – основных планировочных элементов города, влияющих на степень развития территории (магистраль, площади, деловые центры), и «ткани» – массовой застройки, формирующей повседневную среду жизни горожан (жилые районы, дворы). Практическая ценность работы А.Э. Гутнова заключается в возможности выявления каркаса через количественные показатели интенсивности освоения территории. Районы с наибольшими значениями доступности, плотности и функциональной насыщенности составляют каркас, который является главным элементом, определяющим городское развитие. Для выявления каркаса транспортных и пешеходных коммуникаций использу-

ется параметр связности. Связность – это количественный показатель, характеризующий доступность функциональных элементов города (места расселения, рабочие места, объекты обслуживания) относительно рассматриваемой территории в заданный лимит времени. Например, связность с населением оценивает, сколько жителей могут добраться до района за установленное время, что влияет на потенциальную посещаемость территории.

Г.В. Мазаев в своих исследованиях по определению свойств компактности городских структур на основе геометрической топологии пространств формулирует теоремы компактности, одной из которых является теорема связности [3]. Теорема связности определяет степень целостности естественного градостроительного пространства, разделённого природными или антропогенными рассечениями. Связность градостроительного пространства характеризуется коэффициентом связности, который выражается отношением числа осуществлённых планировочных связей через рассечение к их возможному количеству. Рост числа рассечений естественного градостроительного пространства, по Г.В. Мазаеву, ведёт к снижению возможности осуществления в нём компактных градостроительных структур и понижению связности планировочной структуры. Г.В. Мазаев отмечает, что, в отличие от абстрактных рассечений математических пространств, в градостроительстве рассечения представлены физическими объектами: реками, оврагами, линейными транспортными магистралями. И кроме того, в градостроительном проектировании доступны методы преодоления природных и антропогенных рассечений, восстанавливающие связность градостроительного пространства.

Научные работы А.В. Крашенинникова посвящены внедрению знаний когнитивных наук в градостроительную практику. Предложенные им когнитивные модели определяют градостроительное пространство через социальные взаимодействия в городской среде. Городские территории, ограниченные условиями пешеходной доступности и имеющие возможности взаимодействия людей, автор определяет в типологический ряд макропространств. Основными характеристиками макро-пространств выступают пешеходная доступность и социальная связанность [4]. Доступность – это количество времени или расстояние, которое необходимо преодолеть до территории рассмотрения. Связанность Крашенинников А.В. определяет как критерий открытости территории для других людей, который характеризуется количеством возможных социальных контактов. Рассчитывать связанность предлагается как отношение количества людей, которые теоретически могут встретиться в каком-либо макропространстве, к общему числу людей в ареале потенциальной транспортно-пешеходной доступности. Условия доступности и связанности мест сосредоточения событий определяют степень физического освоения городской территории. Чем эффективнее развита улично-дорожная сеть, иными словами, чем выше доступность, тем больше будет связанность, что приведёт к более интенсивным социальным взаимодействиям, а значит, к росту привлекательности городской территории.

Вопросами внутригородской связности интересовались и другие исследователи. На стыке естественных и социальных наук В.Л. Глазычев рассматривает целостность городской среды как результат социальных взаимодействий в городском пространстве [5]. О.А. Баевский разработал идею «каркасно-тканевой» модели А.Э. Гутнова и дополнил её «территориально-коммуникационной» моделью [6]. Ключевыми факторами планировочной организации территории у О.А. Баевского являются насыщенность и связность. Насыщенность понимается как концентрация населения или объектов притяжения на территории, а связность – как развитость транспортных или пешеходных связей. Связность в «территориально-коммуникационной» модели рассчитывается как суммарное количество объектов притяжения или численность населения в пределах зоны, достижимой за заданное время.

А.А. Потапенко в своих работах, посвящённых оценке резервов и повышению эффективности пространственной организации г. Владивостока, опирается на исследование О.А. Баевского [7]. Автор использует методы алгоритмического моделирования на основе альтернативных городских данных (сотовые данные, данные онлайн-сервисов, геоинформационные данные OpenStreetMap) для построения территориально-коммуникационной модели г. Владивостока. Применение алгоритмических методов обеспечивает актуальность и объективность

результатов исследования. Для Владивостока А.А. Потапенко удалось выявить структурообразующий каркас города: территории, обладающие высокой связностью и насыщенностью, – каркас города, со средней связностью и насыщенностью – ткань города и территории с диспропорциями связности и насыщенности – ресурс развития города.

В математическом моделировании для анализа пространственной организации городских территорий широко используется модель Space Syntax, разработанная Б. Хиллером [8]. Модель позволяет понять, как конфигурация улиц и их пространственные взаимосвязи влияют на социальные, экономические и функциональные аспекты городской жизни. Space Syntax используется для определения пешеходной доступности улиц, прогнозирования загруженности дорог и пешеходных потоков. Инструмент даёт возможность предварительно оценить градостроительные решения на предмет увеличения либо сокращения транспортных и пешеходных планировочных связей. Связность (Connectivity) в Space Syntax – это локальная мера, которая показывает, сколько прямых связей (пересечений) имеет конкретная улица (осевая линия или сегмент) с соседними улицами в городской сети. Чем больше пересечений с другими улицами, тем больше вариантов передвижения, тем выше связность территории.

Для моделирования связности городских систем в большинстве современных исследований применяется модель гравитационно-дискретного выбора (Gravity-Discrete Choice Model), предложенная М. Бэтти [9]. Модель позволяет спрогнозировать сценарии перемещения людей в городской среде, учитывая влияние расстояния, развитость инфраструктуры, привлекательность точек притяжения и других факторов, определяющих выбор.

Несмотря на значительный объём теоретических работ, посвящённых определению и расчёту связности, остаётся недостаточно проработанной практическая сторона вопроса – отсутствуют систематизированные методы решения проблем несвязных территорий. Большинство существующих исследований фокусируется на планировочной реорганизации улично-дорожной сети, тогда как альтернативные объёмно-планировочные и архитектурные решения восстановления связности градостроительных пространств требуют дополнительного изучения.

Освоение пространств транспортных магистралей как метод восстановления связности

Интенсивное развитие многих городов мира в середине XX века было возможно лишь благодаря масштабному расширению транспортных систем, однако сегодня крупные магистрали, некогда служившие драйвером роста, теперь рассекают городскую ткань, нарушая планировочный каркас и вынуждая искать методы восстановления утраченных территориальных связей. Для решения проблемы доступности территорий, разорванных транспортными магистралями, часто бывает недостаточно только перепроектирования городских улиц. Устройство наземных пешеходных переходов может быть невозможно в силу непрерывности движения транспорта либо в условиях сложного антропогенного рельефа. Альтернативным методом восстановления связности становится освоение пространств транспортных магистралей – подход, характерный для развитых стран, где градостроительная политика направлена на восстановление исторического планировочного каркаса городов.

Использование территориальных резервов дорожного полотна подразумевает архитектурное формирование многоуровневых многофункциональных транспортно-пешеходных объектов в зоне транспортной инфраструктуры [10]. Для удобства автором статьи вводится понятие *многоуровневые пространства транспортных магистралей* (далее – МПТМ). Многоуровневое пространство транспортных магистралей – это комплексное архитектурное сооружение, в которой транспортные и пешеходные потоки разделяются по вертикали за счёт использования надземных, наземных, подземных или полуподземных уровней. Благодаря включению общественных пространств, объектов торговли и услуг такие сооружения не только обеспечивают связность территории, но и повышают привлекательность городской среды, становятся центрами развития района и способствуют привлечению бизнеса.



Рис. 1. Основные приёмы организации многоуровневых пространств транспортных магистралей (МПТМ) по расположению транспортного уровня (графика У.М. Смекалиной)

Fig. 1. The main methods for organizing multilevel spaces of transport highways according to the location of the transport level (graphics by U.M. Smekalina)

Исследование международного опыта проектирования и реализации многоуровневых транспортно-пешеходных сооружений позволило сформулировать **основные приёмы организации МПТМ по расположению транспортного уровня** (рис. 1):

1. *Подземный транспортный уровень.* Такое решение освобождает поверхность земли для пешеходов, в то время как весь транспорт уходит под землю. Этот приём особенно актуален для исторических центров и прибрежных территорий, где отсутствуют планировочные резервы для расширения пешеходных пространств.

2. *Полуподземный транспортный уровень.* Приём представляет собой частичное перекрытие участка магистрали, где дорожное полотно проходит ниже антропогенного рельефа местности. В отличие от тоннелей, такие решения не требуют сложных систем вентиляции и эвакуации.

3. *Наземный транспортный уровень.* Транспорт остаётся на поверхности, а пешеходные связи переносятся на пешеходные мосты, надземные парки или здания над магистралями. Грамотное сочетание функциональной насыщенности и открытых общественных пространств делает такие объекты драйверами развития территории.

4. *Надземный транспортный уровень.* Это общественные пространства под путепроводами и эстакадами. Решение позволяет эффективно использовать подмостовые пространства, превращая депрессивные зоны в центры городской активности.

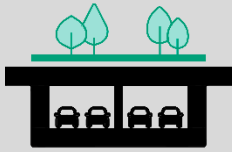
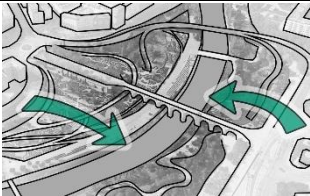
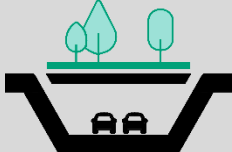
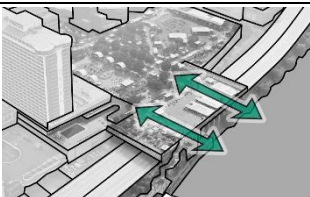
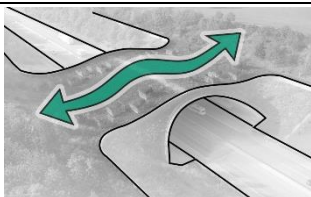
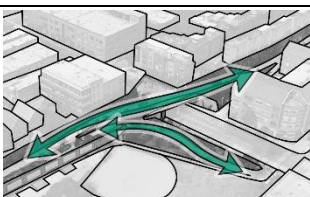
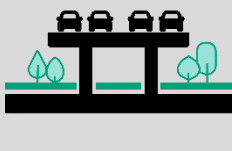
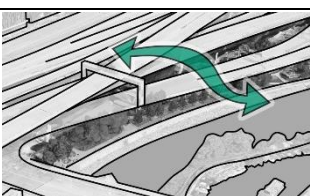
Современные города вынуждены искать альтернативные методы восстановления связности, нарушенной транспортными магистралями, поскольку традиционные решения (наземные переходы, перепроектирование улиц) часто оказываются неэффективными. Многоуровневые пространства транспортных магистралей (МПТМ), предлагающие подземные, полуподземные, наземные и надземные решения, не только восстанавливают разрушенные связи, но и создают новые точки притяжения, становясь катализаторами развития городской среды.

Основные приёмы архитектурно-пространственной организации МПТМ как средства восстановления пространственной связности

Говоря об отсутствии связности на городской территории, требуется определить основные виды разделяющих элементов (барьеров). Барьеры делятся на две группы: природные и антропогенные. К первым относятся реки, овраги, вершины сопков и обрывы, а ко вторым – автомобильные магистрали, железнодорожные пути, линии инженерных сетей и промзоны. Данная работа исследует возможности преодоления транспортных инфраструктурных объектов (автомобильные и железнодорожные магистрали) как барьеров антропогенного характера.

Таблица 1 / Table 1

Основные приёмы восстановления пространственной связности
The main methods of restoring urban connectivity

	1. Восстановление связности на урбанизированных территориях	2. Восстановление связности на пересечении урбанизированных и природных территорий	3. Восстановление связности на природных территориях
 Подземный транспортный уровень	 The Big Dig, Бостон, США, 2008	 Madrid RIO, Мадрид, Испания, 2011	 Tunnel Altfranken, Дрезден, Германия, 2002
 Полуподземный транспортный ур.	 Klyde Warren Park, Даллас, США, 2012	 Riverfront Plaza Луисвилл, США, 1973	 Green Bridge A1, Виттлих, Германия, 2005
 Наземный транспортный уровень	 Bloomingdale Trail Park, Чикаго, США, 2015	 Olympic Sculpture Park, Сиэтл, США, 2007	
 Надземный транспортный уровень	 Sabine Promenade, Хьюстон, США, 2006	 Underground at Ink Block, Бостон, США, 2013	

Транспортные магистрали и железнодорожные пути нарушают связность как урбанизированной городской среды, так и природных зон, отрезают городские территории от набережных и лесных массивов. В плотно урбанизированной среде (городские центры, периферийные районы, зоны активной застройки) линейные транспортные объекты становятся непреодолимыми барьерами, разделяют районы города, затрудняя пешеходные связи, создают высокую шумовую нагрузку и вредные выбросы от проезжей части. На пересечении урбанизированной и природной среды (набережные, пригородные рекреационные территории) антропогенные барьеры ограничивают доступ горожан к береговой линии и зелёным зонам. В природной среде инфраструктурные объекты разделяют зелёный каркас, нарушая экологические коридоры и снижая биоразнообразие.

Современный зарубежный практический опыт предлагает ряд эффективных решений для формирования многоуровневых пространств транспортных магистралей в условиях различных градостроительных и природных контекстов. Эти подходы позволяют восстановить пространственную связность территорий, снизить шумовую нагрузку и вредные выбросы в

окружающую среду, вернуть городам набережные, а природным заповедникам обеспечить целостность зелёных коридоров.

Разберём основные приёмы восстановления связности посредством формирования МПТМ в зависимости от расположения транспортного уровня и с учётом контекста пространственной среды (табл. 1):

1. Приёмы восстановления связности на урбанизированных территориях

Подземный транспортный уровень – устройство тоннельных вставок, подземных парковок, подземных транспортно-пересадочных узлов позволит освободить значительные территории под зелёные насаждения и общественные пространства в застроенных районах города. Rose Fitzgerald Kennedy Greenway, The Big Dig в Бостоне (США, 2008) – знаковый пример решения проблем связности городской среды за счёт переноса транспортной магистрали под землю [11]. Наземное пространство было преобразовано в линейный парк, ставший визитной карточкой города.

Полуподземный транспортный уровень – частичное перекрытие магистрали в соответствующих условиях антропогенного рельефа. Klyde Warren Park в Далласе (США, 2012) служит ярким образцом восстановления городской связности через перекрытие транспортной магистрали [11, 12]. Проект объединил разделённые кварталы, создав над автострадой зелёную пешеходную зону с фонтанами, амфитеатром и общественными площадками.

Наземный транспортный уровень – перенос пешеходного уровня на пешеходные мосты и приподнятые парки. Bloomingdale Trail (The 606) в Чикаго (США, 2015) – пример реорганизации заброшенной железнодорожной ветки длиной 4,3 км в многофункциональное наземное общественное пространство, соединяющее четыре района города [13].

Надземный транспортный уровень – преобразование территорий под эстакадами в качественные общественные пространства. Sabine Promenade в Хьюстоне (США, 2006) – проект благоустройства подмостового пространства автомагистрали I-45 вдоль бульвара Сабин, где депрессивную зону удалось превратить в популярное городское пространство [14].

2. Приёмы восстановления связности на пересечении урбанизированных и природных территорий

Подземный транспортный уровень – заглубление транспортных артерий ниже уровня земли возвращает прибрежные территории людям. Madrid Río в Мадриде (Испания, 2011) – перенос магистрали М-30 в тоннель освободило 10 км заброшенных территорий вдоль берега для непрерывной системы парков и общественных пространств, что позволило связать город с рекой Мансанарес [15].

Полуподземный транспортный уровень – небольшие по площади перекрытия, обеспечивающие связь с набережными или природными комплексами. Riverfront Plaza/Belvedere в Луисвилле (США, 1973) – решение преобразования 6-полосной скоростной трассы (River Road), разделявшей город и набережную, в многоуровневый общественный комплекс, предоставляющий беспрепятственный доступ к воде [12].

Наземный транспортный уровень – пересечение транспортных магистралей с помощью надземных пешеходных структур для формирования связи городских пространств и природных территорий. Olympic Sculpture Park в Сиэтле (США, 2007) – проект превратил заброшенную промышленную зону и транспортный коридор в эффектный Z-образный зелёный мост между деловым центром и набережной Эллиотт-Бей [16].

Надземный транспортный уровень – реорганизация участков под автомагистралями для обеспечения связей с прибрежными территориями. Underground at Ink Block в Бостоне (США, 2013) – пример ревитализации подэстакадного узла, соединившего городские кварталы с набережной Charles River [14]. Проект позволил вдохнуть новую жизнь под 8-полосной магистралью и создать многофункциональное пространство с паблик-артом, скейт-парком, воркаут-площадкой и стрит-фудом.

3. Приёмы восстановления связности на природных территориях

Подземный транспортный уровень – устройство тоннельных вставок при строительстве транспортной инфраструктуры в природоохранных зонах. Tunnel Altfranken в Дрездене

(Германия, 2002) – пример восстановления экологических связей между разделёнными природными территориями через строительство тоннеля под важной природоохранной зоной [17]. Проект обеспечил условия для миграции 17 охраняемых видов животных, восстановил исторический ручей Weißeritz, улучшил качество воздуха и снизил акустическое воздействие автомагистрали.

Полуподземный транспортный уровень – в Нидерландах и Германии широко применяются экодукы – специальные переходы для животных над магистралями, которые восстанавливают экологические коридоры. Green Bridge A1 в Виттлихе (Германия, 2005) – проект, доказавший, что даже на интенсивных автомагистралях возможно создание эффективных экологических коридоров без ущерба для транспортных потоков [17]. Экодук вернул пути миграций, снизил риск ДТП с участием диких животных, восстановил связь между природными парками Eifel и Hunsrück.

Мировая практика формирования многоуровневых пространств транспортных магистралей демонстрирует широкий спектр приёмов восстановления связности посредством освоения территориальных резервов дорожного полотна, от заглубления магистралей до создания экодуков. Представленные решения сохраняют транспортные связи, при этом преобразуют их из барьеров территории в точки притяжения и центры городской активности.

Основные приёмы формирования системы МПТМ как средства восстановления пространственной связности на различных масштабных уровнях

Частные проекты многоуровневых пространств транспортных магистралей улучшают связность лишь на локальном уровне, поскольку фокусируются на решении конкретных задач, таких как создание альтернативных пешеходных маршрутов, преодоление рельефа, распределение транспортных потоков. Однако для восстановления связности города в целом необходим комплексный подход, учитывающий взаимосвязь всех элементов транспортной инфраструктуры, пешеходных пространств и природных зон. Одним из возможных решений является проектирование системы многоуровневых пространств транспортных магистралей в сочетании с мерами по благоустройству улиц.

Комплексный подход позволяет сформировать стратегию проектных решений на разных масштабных уровнях: от городского планирования до локальных проектов. Например, на уровне города могут разрабатываться концепции устойчивого развития зелёного каркаса города, на уровне района – решения по формированию пешеходных связей между общественными пространствами, а на уровне улицы – меры по преодолению антропогенных или природных барьеров. Подобные стратегии уже реализуются в ряде развитых городов мира. Сочетание многоуровневых транспортно-пешеходных сооружений с реорганизацией улиц, приоритетом общественного транспорта и расширением зелёных коридоров способствует улучшению качества жизни горожан за счёт повышения пешеходной доступности, снижения вредных выбросов в атмосферу и уменьшения шумовой нагрузки от транспортных магистралей.

The Green Rays (Raggi Verdi), Милан. Милан – столица мировой моды, но многие люди не знают, что этот итальянский город также является одним из лидеров устойчивого городского развития. Для этого городские власти реализуют целый комплекс стратегий, охватывающих вопросы экологии, меры по повышению транспортной и пешеходной мобильности и современные подходы градостроительного планирования. Ключевые решения включают проекты трансформации заброшенных железнодорожных узлов в непрерывную сеть парков, инициативы по масштабной высадке деревьев для снижения температуры и поглощения углекислого газа, стандарты по обязательному озеленению новой застройки, в том числе вертикальное озеленение фасадов, шаги по сокращению личного транспорта в центральных районах города за счёт активного развития инфраструктуры общественного транспорта и расширения велоинфраструктуры.

Знаковым проектом для Милана, определившим направление его развития как зелёного пешеходного города с высоким качеством жизни, стала концепция The Green Rays (Raggi

Verdi) архитектора Андреаса Кипара и студии LAND, предложенная в 2003 году [18]. Стратегия предполагала создание системы зелёных лучей, выходящих из центра и соединяющих город и территории пригорода, где лучи сходятся в круглое зелёное кольцо (рис. 2). За более чем 20 лет существования проект эволюционировал от концепции локальных озеленённых маршрутов до комплексной системы, направленной на восстановление связности общественных пространств на различных масштабных уровнях: города, района, улицы. На городском уровне The Green Rays (Raggi Verdi) представляет собой систему восьми зелёных лучей, расходящихся от центра к периферии и связывающих парки, бульвары и пешеходные зоны. В масштабе района проект взаимодействует с такими инициативами, как Green River (Fiume Verde), преобразуя 7 бывших железнодорожных узлов в непрерывную сеть общественных пространств.

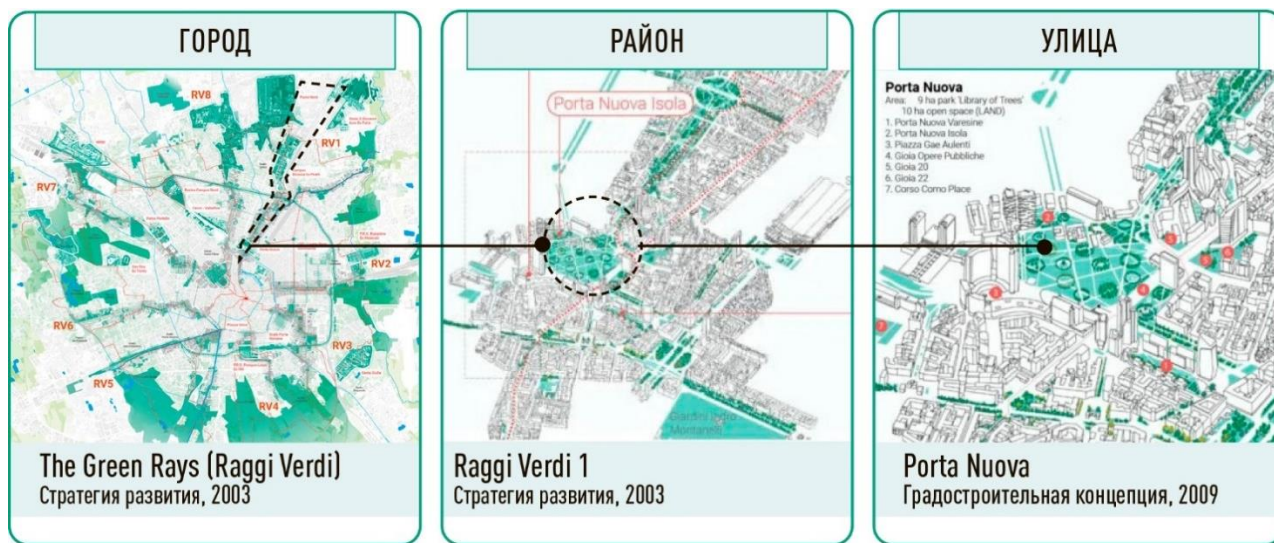


Рис. 2. The Green Rays (Raggi Verdi), Милан, стратегия восстановления связности в масштабах города, района, улицы [18] (графика У.М. Смекалиной)

Fig. 2. The Green Rays (Raggi Verdi), Milan, a strategy for restoring urban connectivity across the city, district, street [18] (graphics by U.M. Smekalina)

Одним из самых ярких примеров локальной реализации проекта стал Porta Nuova, часть первого луча Raggi Verdi (рис. 2), который превратил заброшенные промышленные территории и железнодорожные пути в самом центре города в современный многофункциональный район [18]. Porta Nuova – это масштабный пример многоуровневого пространства транспортных магистралей, где транспорт был заглублён в тоннели. Такое решение освободило площадь на уровне земли для создания огромного парка Библиотека деревьев (Biblioteca degli Alberi – BAM) и формирования общественной и жилой застройки, например жилого комплекса Вертикальный лес (Bosco Verticale), спроектированного Стефано Боззи. Проект Porta Nuova позволил «сшить» три района, разделённых автомобильными и железнодорожными магистралями, тем самым восстановив ткань центральной части города.

The Blue Ring, Сиэтл. Сиэтл – один из самых быстрорастущих крупных городов США. Власти давно осознали, что без чётко спланированной системы общественных пространств рост населения и связанная с этим высокая плотность застройки способны привести к тому, что в центральных районах города попросту не останется свободных территорий под парки, скверы, места собраний и отдыха. Увеличение количества жилых домов и рабочих мест требует стратегически подходить к созданию открытых пространств, необходимых для комфортной жизни в городе. В 2002 году было представлено видение зелёной инфраструктуры Сиэтла в следующем столетии Open Space Seattle 2100 [19] (рис. 3). Эта концепция была разработана, чтобы обеспечить механизм координации большого количества планов на территории всего Сиэтла и частных проектов в центре города, а также сформировать целостную систему обще-

ственных пространств. Долгосрочное планирование позволяет прогнозировать будущие сценарии развития города, а также реагировать на сложные вызовы, такие как глобальные климатические изменения, риски землетрясений и демографические сдвиги, заблаговременно предлагать комплексные градостроительные и архитектурные решения.

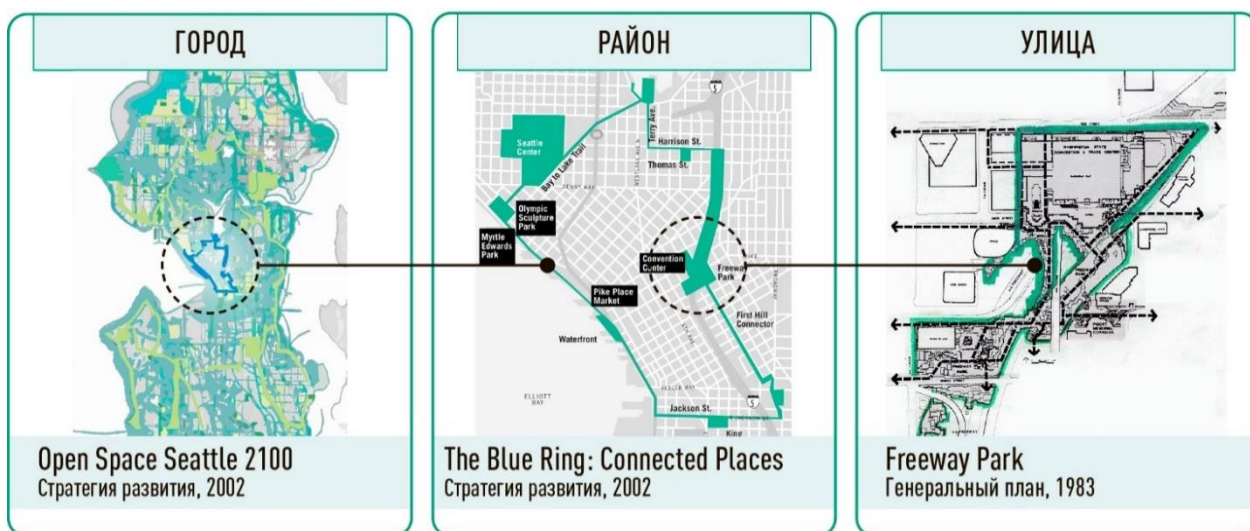


Рис. 3. The Blue Ring, Сиэтл, стратегия восстановления связности в масштабах города, района, улицы [19] (графика У.М. Смекалиной)

Fig. 3. The Blue Ring, Seattle, a strategy for restoring urban connectivity across the city, district, street [19] (graphics by U.M. Smekalina)

Нехватка открытых пространств в центре Сиэтла – проблема, которую усугубляют высокая стоимость земли и плотная застройка. Однако в городе нашли решение: использовать проезжую часть в качестве планировочного резерва территории. Этот подход не нов – ещё в 1970-х в Сиэтле начали проектировать парки над магистралями, чтобы смягчить последствия строительства межштатной магистрали I-5, разделившей районы города. В 2002 году компания CityDesign сформировала стратегию развития открытых пространств для центра Сиэтла The Blue Ring [12, 19]. В концепции предлагалось связать в единое пешеходное кольцо существующие парки над проезжей частью, водные объекты, площади и пешеходные зоны, а также добавить новые общественные пространства, чтобы создать комфортную среду для прогулок и отдыха (рис. 3). The Blue Ring – это продолжение стратегии Open Space Seattle 2100, предлагающее конкретные решения по обеспечению пешеходной связности на уровне центрального района города.

В качестве частного примера освоения пространства транспортных магистралей стоит привести Freeway Park в Сиэтле (рис. 3). Freeway Park был построен из-за необходимости восстановить связь между районами, разделёнными магистралью I-5 [20]. Архитекторы Лоуренс Халприн и Анжела Данаджиева предложили необычное решение: построить парк прямо над проезжей частью, превратив барьер территории в средство для его преодоления. Freeway Park – это многоуровневое пространство, где перепады высот и сложный рельеф стали отличительной чертой архитектурного образа парка. Пространство словно «стекает» террасами к магистрали I-5, создавая динамичный ландшафт из бетонных платформ, лестниц и густой растительности. Применение в благоустройстве каскадов воды заглушает шум автомобилей. Freeway Park стал популярным местом притяжения людей, тем самым доказал, что даже над оживлённой транспортной магистралью можно создать интересное и функциональное общественное пространство.

Таким образом, восстановление связности города требует комплексного подхода, сочетающего освоение пространств транспортных магистралей с развитием сети пешеходных маршрутов и зелёных зон, что подтверждается успешными примерами Милана и Сиэтла. В

масштабе города это предполагает расширение зелёных коридоров, в масштабе района – формирование системы пешеходных пространств, а в масштабе улицы – преодоление барьеров за счёт архитектурного формирования транспортно-пешеходных сооружений в границах магистралей. Реализация подобных стратегий не только улучшает связность открытых пространств, но и повышает качество городской среды, создавая комфортные условия для жизни.

Апробация приёмов восстановления пространственной связности путём формирования МПТМ на различных масштабных уровнях на примере г. Владивостока

Для восстановления связности городской среды Владивостока необходим комплексный подход, учитывающий взаимосвязь всех планировочных элементов: развитой транспортной инфраструктуры, сети пешеходных зон и единства природных территорий. Предложенным в исследовании методом обеспечения связности является проектирование системы многоуровневых пространств транспортных магистралей (МПТМ), сочетающееся с реорганизацией улиц и благоустройством общественных территорий. Такой подход позволяет вернуть пешеходную доступность городской среды и непрерывность зелёных коридоров, не снижая при этом пропускную способность транспортных артерий, что достигается за счёт продуманной стратегии пространственного развития.

Формирование многоуровневых пространств транспортных магистралей в масштабе города (рис. 4). Разработанная для Владивостока концепция восстановления связности территорий служит механизмом координации различных проектов, включая предложения генерального плана, мастер-планов и локальных инициатив. Долгосрочная стратегия развития планировочного каркаса Владивостока требует учёта таких ключевых проектов, как:

1. Строительство Владивостокской кольцевой автомобильной дороги (ВКАД), дублирующей магистрали вдоль Амурского залива, которая разгрузит основные транспортные маршруты города [21].

2. Создание системы «лёгкого метро», городской электрички на базе существующих в городе железнодорожных путей, которая позволит отказаться от личных автомобилей в пользу скоростного внеуличного общественного транспорта [21].

3. Перенос нефтебазы из центральной части города за его пределы, что освободит территорию долины Первой Речки для реализации проекта общественно-делового центра Владивостока по мастер-плану Nikken Sekkei [22].

4. Реновация жилых районов города по мастер-плану Владивостока, что повысит привлекательность локальных городских пространств для жителей и владельцев бизнеса [21].

5. Формирование велосипедного маршрута вдоль Амурского залива, что создаст запрос на развитие качественной велоинфраструктуры в других районах города для организации единой велопешеходной сети [21].

Результатом разработки стратегии развития Владивостока стала схема мастер-плана, включающая основные перспективные предложения МПТМ, способные восстановить пространственную связность в масштабе города (рис. 4). Перекрытие ВКАД по проекту Nikken Sekkei обеспечит связь многофункционального района с набережной Амурского залива [22]. Формирование транспортно-пересадочного узла системы «лёгкого метро» на пересечении с остановкой железнодорожного транспорта «Первая Речка» свяжет новый Бизнес-хаб на территории бывшей нефтебазы с жилыми районами Первой Речки [21]. Предложение по созданию тоннельной вставки вдоль Партизанского проспекта позволит сформировать зелёный коридор от Покровского парка к кольцу Инструментального завода. Соединение территории Тоннеля имени Сталина (Владивостокского тоннеля Дальневосточной железной дороги) повысит доступность прилегающих жилых районов Народного проспекта и улицы Жигура, а также сформирует альтернативные пешеходные маршруты для транспортного узла 3-я Рабочая. Планируемые преобразования позволят комплексно развивать пешеходный, транспортный и зелёный каркасы города, увеличив пешеходную доступность и безопасность перед-

вижений, повысив качество инфраструктуры общественного транспорта и обеспечив связи между зелёными пространствами города и литоральной зоной.

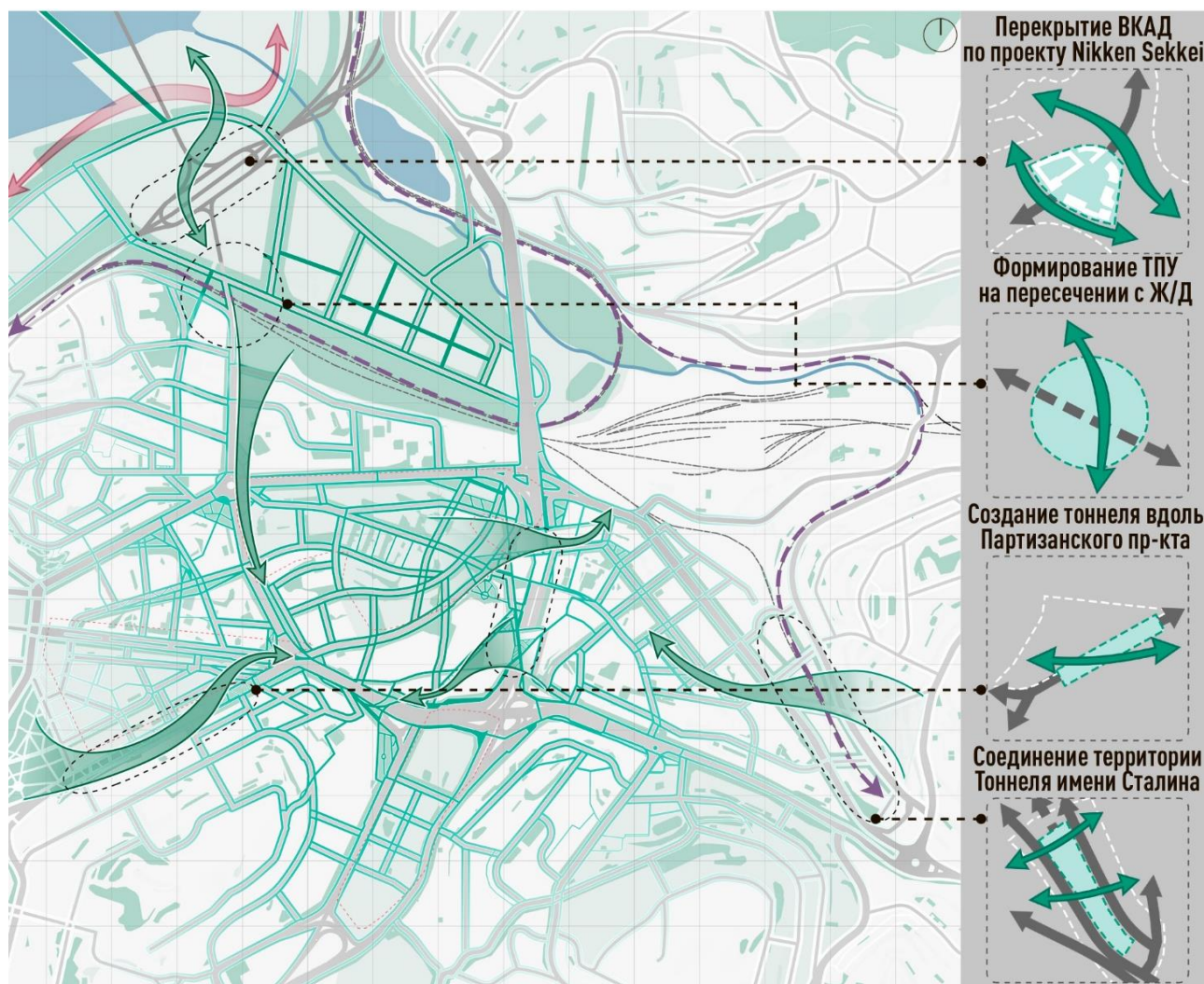


Рис. 4. Концепция восстановления пространственной связности в масштабе города, на примере г. Владивостока (графика У.М. Смекалиной)

Fig. 4. The concept of restoring urban connectivity on a city-wide scale, as demonstrated by the example of Vladivostok. (graphics by U.M. Smekalina)

Формирование многоуровневых пространств транспортных магистралей в масштабе района (рис. 5). В масштабе района концепция развития многоуровневых пространств транспортных магистралей (МПТМ) направлена на восстановление пешеходной доступности и создание системы открытых пространств. Для проектирования был выбран участок долины Первой Речки, в границах транспортных развязок: кольцо Первой Речки, кольцо Инструментального завода, Гоголевская развязка (Мост дружбы Тояма – Приморье) и развязка в районе остановки «Некрасовская». Территория образует замкнутый кольцевой маршрут в улицах: Некрасовская, Океанский проспект, проспект Острякова и проспект Красного Знамени.

Анализ выявил ключевые проблемы: участки вдоль проспекта Красного Знамени и улицы Некрасовской практически непроницаемы для пешеходов из-за интенсивного транспортного потока, в то время как Океанский проспект и проспект Острякова демонстрируют высокую пешеходную активность. Концентрация объектов притяжения (коммерции, общественных пространств и парков) требует связности, которую могут обеспечить МПТМ. Пространственный анализ подчеркнул необходимость преодоления антропогенных барьеров, используя различные приёмы формирования МПТМ. Основная задача проектного предложения

на уровне района – объединить локальные решения, такие как пешеходные мосты и тоннельные вставки, в единую систему, улучшающую и транспортную, и пешеходную связность территории.

План развития района представляет перспективное видение пешеходного кольцевого маршрута, в котором благодаря формированию многоуровневых пространств транспортных магистралей создаются новые связи с открытыми пространствами и озеленёнными территориями. Предложены локальные решения МПТМ (рис. 5), комплексная реализация которых обеспечит восстановление пространственной связности в масштабе долины Первой Речки:

1. Реконструкция транспортной развязки по улице Некрасовской. Решение улучшит транспортную связность и обеспечит более удобное пересечение магистрали пешеходами.

2. Перекрытие на двух участках транспортной магистрали по улице Некрасовской жилыми районами. Такое предложение тоннельных вставок позволит сформировать новые пространственные связи и восстановить пешеходную доступность территории.

3. Транспортно-пешеходная развязка Инструментального завода. Уникальные условия антропогенного ландшафта кольца Инструментального завода позволят сформировать на его месте двухуровневый транспортно-пешеходный узел, который повысит транспортную связность и создаст зелёную пешеходную связь от Тополиной аллеи к Партизанскому проспекту.

4. Пешеходный мост с общежитиями ВГУ. Проект сформирует надземный парк на труднопреодолимом участке проспекта Красного Знамени. Решение также станет частью нового пешеходного каркаса и свяжет систему общественных пространств с Садам дружбы То-яма – Владивосток.

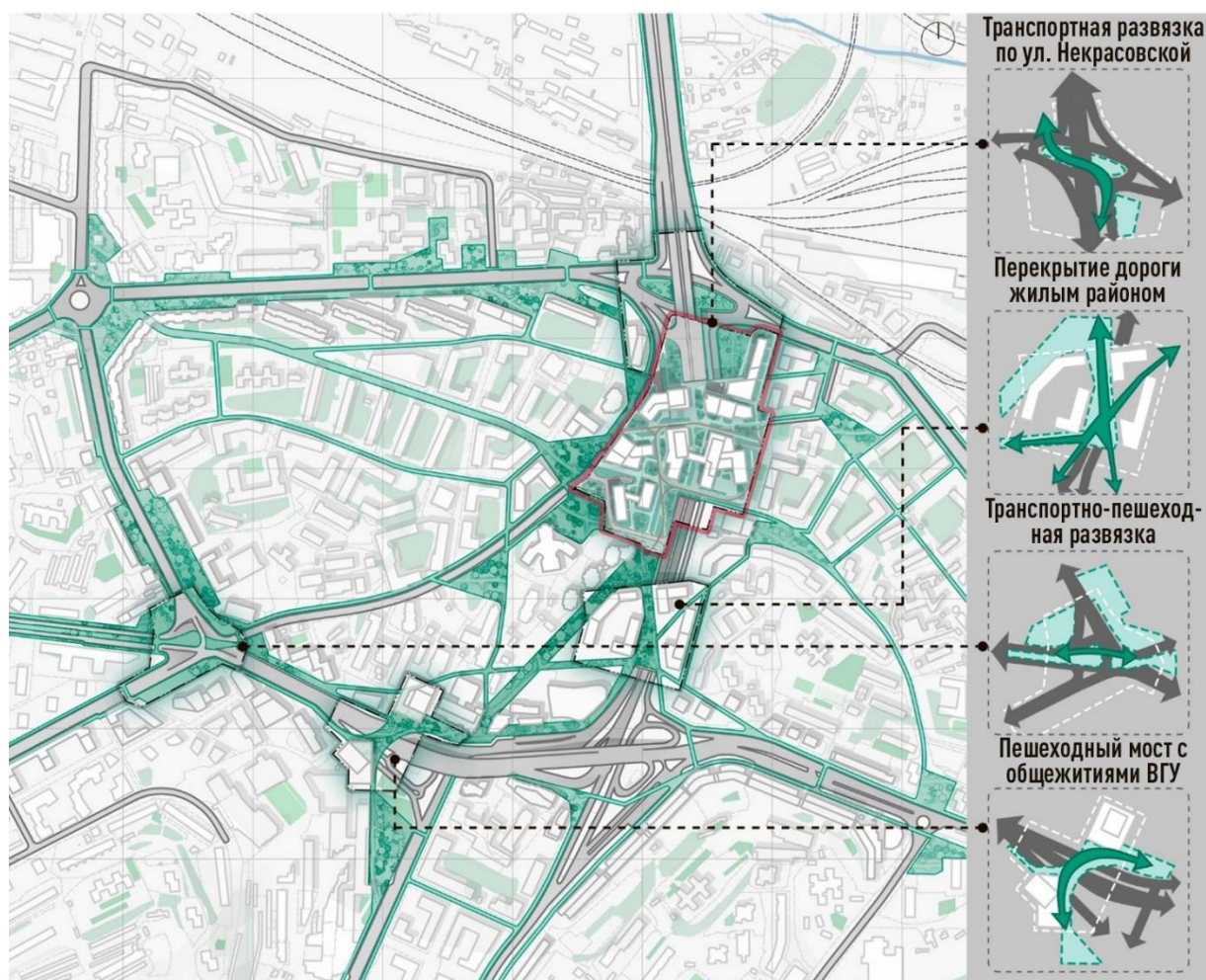


Рис. 5. Концепция восстановления пространственной связности в масштабе района, во Владивостоке, на примере района Первой Речки (графика У.М. Смекалиной)

Fig. 5. The concept of restoring urban connectivity on a district-wide scale in Vladivostok, using the example of the First River district (graphics by U.M. Smekalina)

Таким образом, реализация концепции МПТМ в долине Первой Речки позволит создать целостную, экологичную и безопасную городскую среду, где транспортная инфраструктура органично сочетается с развитой сетью пешеходных маршрутов и зелёных пространств. Данный проект может стать моделью для преобразования других проблемных участков города, демонстрируя эффективность комплексного подхода к организации городских территорий.

Формирование многоуровневых пространств транспортных магистралей в масштабе улицы (рис. 6). Для разработки частного решения МПТМ была выбрана территория в районе остановки «Некрасовская». Пешеходная связность участка слабая, транспортная магистраль делит район на две части, наблюдается загазованность территории и высокая шумовая нагрузка от дороги. Основная идея заключается в использовании территориальных резервов дорожного полотна для организации новых общественных пространств при сохранении транспортной связности. Ключевым элементом становится перекрытие участка магистрали тоннельной вставкой, что позволит снизить шумовое воздействие и улучшить экологическую обстановку. На освободившейся территории предлагается создать многофункциональный комплекс с жилыми, офисными, коммерческими и социальными объектами. Особое внимание уделено пешеходным связям – Некрасовский сквер под эстакадой объединён в систему общественных пространств вместе с надземным пешеходным переходом и парком над магистралью. Проектное предложение объединяет 4 приёма организации МПТМ (рис. 6) по расположению транспортного уровня: парк под путепроводом, пешеходный мост над участком магистрали, перекрытие проезжей части открытыми пространствами и многофункциональными объектами, подземный транспортный уровень с паркингом и транспортно-пересадочным узлом.

Архитектурная концепция проекта разработана как «Парадные ворота во Владивосток», что подчёркивает важность этой территории как визитной карточки города. В ходе проектирования было сохранено перспективное раскрытие улицы Некрасовской и её исторически сложившийся образ широкого городского проспекта, однако его функциональное наполнение кардинально изменено: от шумного транспортного коридора – к комфортному пешеходному бульвару. Проектное решение учитывает существующий градостроительный каркас, но также формирует новые оси и связи, создавая, таким образом, целостную пространственную структуру. Особого внимания заслуживает инженерное решение, при котором несущие опоры перекрытия магистрали размещаются в разделительной полосе проезжей части, что наглядно демонстрирует потенциал рационального использования резервов дорожного полотна. Запланированные парковые зоны под путепроводом и над магистралью призваны стать не просто элементами благоустройства, а полноценными центрами общественной жизни, формирующими современную, комфортную и многофункциональную городскую среду. Реализация этого проекта не только решит локальные проблемы улицы Некрасовской, но и станет катализатором развития всего района Первой Речки. Данный проект формирования многоуровневых пространств на уровне улицы следует рассматривать как отправную точку для масштабной стратегии восстановления пространственной связности городской ткани Владивостока.

Таким образом, восстановление пространственной связности Владивостока требует комплексного подхода, объединяющего решения на уровне города (развитие ВКАД, системы «лёгкого метро», реновацию жилой застройки), района (формирование пешеходного кольца в долине Первой Речки) и улицы (многоуровневые проекты, подобные перекрытию магистрали на ул. Некрасовской). Ключевым инструментом реализации этой стратегии выступает концепция многоуровневых пространств транспортных магистралей (МПТМ), которая позволяет обеспечивать пешеходную доступность и единство зелёных пространств города. Предложенные решения – от масштабных инфраструктурных проектов до локальных пешеходных мостов – не только восстановят связность Владивостока, но и создадут модель устойчивого развития, которую можно применять и в других городах с похожими градостроительными условиями

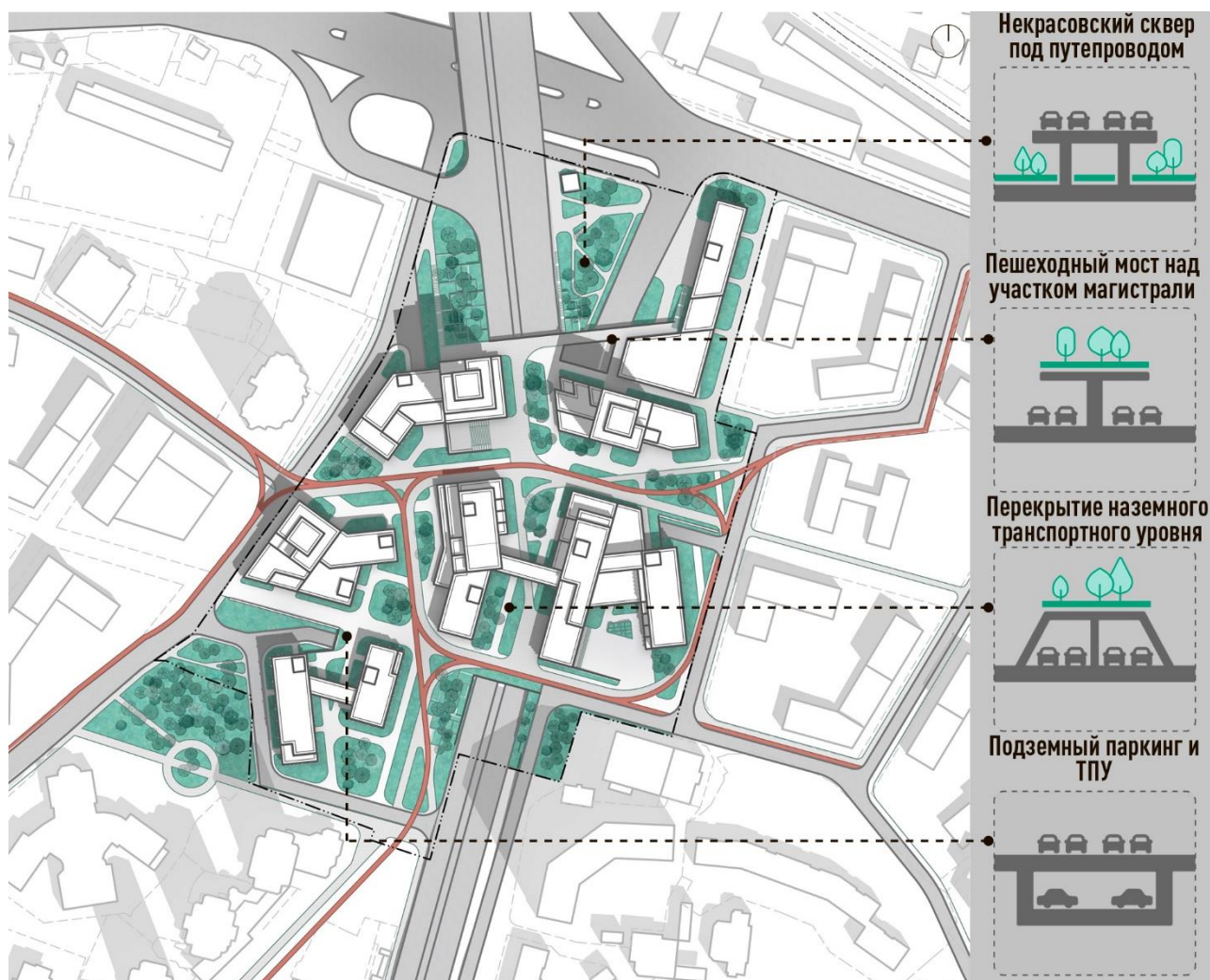


Рис. 6. Концепция восстановления пространственной связности в масштабе улицы во Владивостоке, на примере улицы Некрасовской (графика У.М. Смекалиной)

Fig. 6. The concept of restoring urban connectivity on a street scale in Vladivostok, using the example of Nekrasovskaya Street (graphics by U.M. Smekalina)

Заключение

Исследование позволило достичь следующих результатов:

1. Проанализированы отечественные и зарубежные теоретические работы, посвящённые определению связности. Удалось систематизировать подходы к вычислению связности в городской среде, расширив традиционное понимание понятия как качества транспортной инфраструктуры за счёт включения социальных, функциональных и пространственных аспектов. Анализ работ А.Э. Гутнова, Г.В. Мазаева, А.В. Крашенинникова и других авторов выявил междисциплинарный характер изучения связности, однако подтвердил недостаточную проработанность практических методов её восстановления.

2. Изучены и классифицированы многоуровневые пространства транспортных магистралей (МПТМ) как метод восстановления городской связности. Сформулированы основные приёмы организации МПТМ по расположению транспортного уровня: объекты с подземным, полуподземным, наземным и надземным транспортными уровнями.

3. Выявлены основные архитектурно-пространственные приёмы восстановления связности на разных масштабных уровнях города. На уровне города исследована интеграция МПТМ в транспортно-пешеходный каркас, на уровне района представлена возможность формирования единых пешеходных систем, а на уровне улицы рассмотрены конкретные архитектурно-планировочные решения.

4. *Проверены приёмы архитектурного формирования на примере планировочной структуры г. Владивостока.* Предложена стратегия формирования МПТМ для восстановления пространственной связности г. Владивостока на разных масштабных уровнях.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые проведено комплексное исследование архитектурного формирования многоуровневых пространств транспортных магистралей, в котором они рассмотрены как элемент связности города. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных архитектурно-планировочных решений в реальном проектировании для восстановления пространственной связности территорий. Полученные результаты формируют методическую основу для преобразования городских территорий, разделённых транспортными магистралями, особенно в условиях сложного рельефа и плотной застройки.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

У.М. Смекалина – разработка концепции и дизайна исследования; сбор данных; анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста.

U.M. Smekalina – study conception and design, data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев А.К. Влияние транспортной связности территорий на пространственное развитие города: Выпускная квалификационная работа (ВКР). Москва: НИУ ВШЭ, 2024. 61 с. URL: <https://www.hse.ru/ma/urban/students/diplomas/927268806> (дата обращения: 11.05.2025).
2. Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. Москва: Стройиздат, 1984. 256 с.
3. Мазаев Г.В. Теоремы свойств пространства и изменчивости компактности в градостроительном проектировании // Академический вестник УралНИИПроект РААСН. 2022. Т. 53, № 2. С. 15–21. <https://doi.org/10.25628/UNIIP.2022.53.2.003>
4. Крашенинников А.В. Макро-пространства городской среды // Architecture and Modern Information Technologies. 2016. Т. 36, № 3. С. 1–11. URL: <https://marhi.ru/AMIT/2016/3kvart16/krasheninnikov/abstract.php> (дата обращения: 11.05.2025).
5. Глазычев В.Л. Социально-экологическая интерпретация городской среды. Москва: Наука, 1984. 178 с.
6. Баевский О.А. Модель эволюции – эволюция модели: координация средств управления пространственным развитием города // Многообразие городских миров: история, теория, практика: Сборник статей Всероссийской научной конференции с международным участием, посвящённой 90-летию со дня рождения профессора Е.Н. Перцика, Москва, Россия, 23–24 марта 2021. Москва: Географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 2021. С. 170–182. EDN: WYLPVB.
7. Потапенко А.А. Диспропорции пространственной структуры города как резерв развития каркаса города: территориально-коммуникационная модель и анализ сотовых данных // Урбанистика. 2022. № 4. С. 50–70. DOI: <https://doi.org/10.7256/2310-8673.2022.4.37724>
8. Hillier B. Space is the machine: a configurational theory of architecture. London: Space Syntax, 2007. 355 p. URL: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/3881/1/SITM.pdf> (дата обращения: 11.05.2025).
9. Batty M., Milton R. A new framework for very large-scale urban modelling // Urban Studies. 2021. Vol. 58, № 15. P. 3071–3094. <https://doi.org/10.1177/0042098020982252>
10. Смекалина У.М., Гаврилов А.Г., Бабенко А.Г. Комплексное освоение пространств транспортных магистралей как средство восстановления городской связности // Новые идеи нового века – 2023: материалы Двадцать третьей Международной научной конференции, Хабаровск, Россия, 14–16 февраля 2023. Хабаровск: Издательство ТОГУ, 2023. Т. 2. С. 216–223. EDN: YERVPB.
11. Houston D., Zuniga M.E. Put a park on it: How freeway caps are reconnecting and greening divided cities // Cities. 2019. Vol. 85. P. 98–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.08.007>

12. Bonjukian S. Let's Bury I-5: An urban design framework for freeway lids in downtown Seattle: диссертация магистра городского планирования. Сиэтл, 2015. 136 p. URL: <https://hdl.handle.net/1773/34213> (дата обращения: 11.05.2025).
13. Littke H., Locke R., Haas T. Taking the high line: elevated parks, transforming neighbourhoods, and the ever-changing relationship between the urban and nature // *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*. 2016. Vol. 9, №. 4. P. 353–371. DOI: <https://doi.org/10.1080/17549175.2015.1063532>
14. Как меняются городские пространства: 7 парков под мостами. Опубл.: 12.07.2018 // 34travel.me URL: <https://34travel.me/post/7-parkov-pod-mostami> (дата обращения: 03.05.2025).
15. Madrid RIO / Burgos & Garrido + Porras La Casta + Rubio & Álvarez-Sala + West 8. Опубл.: 11.02.2011 // *archdaily.com*. URL: <https://www.archdaily.com/111287/madrid-rio-west-8-and-mrio-arquitectos> (дата обращения: 03.05.2025).
16. Olympic Sculpture Park / Weiss Manfredi. Опубл.: 06.01.2011 // *archdaily.com*. URL: <https://www.archdaily.com/101836/olympic-sculpture-park-weissmanfredi> (дата обращения: 03.05.2025).
17. Working list of wildlife overpasses worldwide. Опубл.: 04.04.2021 // *panethos.wordpress.com*. URL: <https://panethos.wordpress.com/2021/04/04/working-list-of-wildlife-overpasses-ecoducts-and-grunbrucken/> (дата обращения: 03.05.2025).
18. Green Rays, Milan // *landsrl.com*. URL: <https://www.landsrl.com/en/work/green-rays-raggi-verdi-milano/> (дата обращения: 03.05.2025).
19. Nickels G. Seattle's open space strategy for the center city: The Blue Ring // *CityDesign*. 2002. 19 с. URL: <https://lidi5.org/wp-content/uploads/2016/06/seattle-blue-ring-plan.pdf> (дата обращения: 11.05.2025).
20. Local freeway lid history // *lidi5.org*. URL: <https://lidi5.org/history/> (дата обращения: 03.05.2025).
21. Концептуальный мастер-план Владивостокской агломерации. Опубл.: 19.09.2023 // *vlc.ru*. URL: https://www.vlc.ru/upload/iblock/626/bho58yemtgl8p1x0497sut3v5q5xjmeh/Master_plan_Vladivostokskaya-aglomeratsiya_VEF_09_2023.pdf (дата обращения: 11.05.2025).
22. Концепция развития Владивостокского городского округа. Опубл.: 01.10.2018 // *дом.рф*. URL: <https://дом.рф/urban/fund/project/509058/> (дата обращения: 11.05.2025).

REFERENCES

1. Andreev A.K. The influence of transport connectivity of territories on the spatial development of the city: Final qualifying work. Moscow: HSE, 2024. 61 p. (In Russ.). URL: <https://www.hse.ru/ma/urban/students/diplomas/927268806> (accessed: 11.05.2025).
2. Gutnov A.E. The evolution of urban planning. Moscow: Stroyizdat, 1984. 256 p. (In Russ.).
3. Mazaev G.V. Theorems of space properties and variability of compactness in urban design. *Academic Bulletin of UralNIIproekt RAACS*, 2022, vol. 53, no. 2, pp. 15–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.25628/UNIIP.2022.53.2.003>
4. Krashenninnikov A.V. Macro-spaces of the urban environment. *Architecture and Modern Information Technologies*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 1–11. (In Russ.). URL: <https://marhi.ru/AMIT/2016/3kvart16/krashenninnikov/abstract.php> (accessed: 11.05.2025).
5. Glazychev V.L. Socio-ecological interpretation of the urban environment. Moscow: Nauka, 1984. 178 p. (In Russ.).
6. Baevsky O.A. The model of evolution – the evolution of the model: coordination of management tools for the spatial development of the city. *The diversity of urban worlds: history, theory, practice: A collection of articles at the All-Russian Scientific Conference with international participation dedicated to the 90th anniversary of the birth of Professor E.N. Percik*. Moscow, Russia, March 23–24, 2021. Moscow: Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 2021, pp. 170–182. (In Russ.).
7. Potapenko A.A. Disproportions of the spatial structure of the city as a reserve for the development of the city frame: territorial and communication model and analysis of cellular data. *Urbanistics*, 2022, no. 4, pp. 50–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2310-8673.2022.4.37724> URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=37724 (accessed: 11.05.2025).
8. Hillier B. Space is the machine: a configurational theory of architecture. London: Space Syntax, 2007. 355 p. URL: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/3881/1/SITM.pdf> (accessed: 11.05.2025).
9. Batty M., Milton R. A new framework for very large-scale urban modelling. *Urban Studies*, 2021, vol. 58, no. 15, pp. 3071–3094. <https://doi.org/10.1177/0042098020982252>

10. Smekalina U.M., Gavrilov A.G., Babenko A.G. Integrated development of the spaces of transport highways as a tool for restoring urban connectivity. *The New Ideas of New Century – 2023: The twenty third International Scientific Conference Proceedings. Khabarovsk, Russia, February 14–16, 2023.* Khabarovsk: Published by PNU, 2023, vol. 2, pp. 216–223. (In Russ.).
11. Houston D., Zuniga M.E. Put a park on it: How freeway caps are reconnecting and greening divided cities. *Cities*, 2019, vol. 85, pp. 98–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.08.007>
12. Bonjukian S. Let's Bury I-5: An urban design framework for freeway lids in downtown Seattle: Abstract of Master's degree. (Eng.) thesis. Seattle, 2015. 136 p. URL: <https://hdl.handle.net/1773/34213> (accessed: 11.05.2025).
13. Littke H., Locke R., Haas T. Taking the High Line: elevated parks, transforming neighbourhoods, and the ever-changing relationship between the urban and nature. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, 2016. vol. 9, no. 4, pp. 353–371. DOI: <https://doi.org/10.1080/17549175.2015.1063532>
14. How urban spaces are changing: 7 parks under bridges. Publ.: July 12, 2018. *34travel.me* (In Russ.). URL: <https://34travel.me/post/7-parkov-pod-mostami> (accessed: 03.05.2025).
15. Madrid RIO / Burgos & Garrido + Porras La Casta + Rubio & Álvarez-Sala + West 8. Publ.: February 11, 2011. *archdaily.com*. URL: <https://www.archdaily.com/111287/madrid-rio-west-8-and-mrio-arquitectos> (accessed: 03.05.2025).
16. Olympic Sculpture Park / Weiss Manfredi. Publ.: January 6, 2011. *archdaily.com*. URL: <https://www.archdaily.com/101836/olympic-sculpture-park-weissmanfredi> (accessed: 03.05.2025).
17. Working list of wildlife overpasses worldwide. Publ.: April 4, 2021. *panethos.wordpress.com*. URL: <https://panethos.wordpress.com/2021/04/04/working-list-of-wildlife-overpasses-ecoducts-and-grun-brucken/> (accessed: 03.05.2025).
18. Green Rays, Milan. *landsrl.com*. URL: <https://www.landsrl.com/en/work/green-rays-raggi-verdi-milano/> (accessed: 03.05.2025).
19. Nickels G. Seattle's Open Space Strategy for the Center City: The Blue Ring. *CityDesign*, 2002, 19 p. URL: <https://lidi5.org/wp-content/uploads/2016/06/seattle-blue-ring-plan.pdf> (accessed: 11.05.2025).
20. Local freeway lid history. *lidi5.org*. URL: <https://lidi5.org/history/> (accessed: 03.05.2025).
21. Conceptual master plan of the Vladivostok agglomeration. Publ.: September 19, 2023. *vlc.ru*. (In Russ.). URL: https://www.vlc.ru/upload/iblock/626/bho58yemtgl8p1x0497sut3v5q5xjmeb/Master_plan_Vladivostokskaya-aglomeratsiya_VEF_09_2023.pdf (accessed: 11.05.2025).
22. The concept of development of the Vladivostok city district. Publ.: October 1, 2018. *дом.пф*. (In Russ.). URL: <https://дом.пф/urban/fund/project/509058/> (accessed: 11.05.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Смекалина Ульяна Максимовна – магистр, ассистент, Департамент архитектуры и дизайна, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация).

✉ smekalina.um@dvfu.ru

Ulyana M. Smekalina, Master's degree, Assistant, Department of Architecture and Design, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 11.05.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 22.06.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.