

Перспективы совершенствования технологических подходов строительства морских платформ с учетом критериев эффективности

В.А. Перфилов, А.С. Сальников, Д.Н. Молочков, Д.Д. Бочаров

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: В статье рассматриваются организационно-технологические особенности строительства опор морских платформ и факторы, влияющие на темпы их возведения. На основе сопоставления зарубежного и российского опыта выявлены ключевые ограничения, связанные с ритмичностью опалубочно-бетонных процессов и применяемыми формообразующими системами. Представлены классификации материалов и технологий, а также многокритериальная модель оценки эффективности, позволяющая сравнивать альтернативные решения. Определены перспективные направления совершенствования технологических подходов строительства морских платформ.

Ключевые слова: морские платформы, опоры, строительство, скользящая опалубка, бетонирование, технологические процессы, многокритериальная оценка.

Строительство опор морских платформ требует высокой надежности и устойчивости к внешним нагрузкам, а темпы работ напрямую зависят от организации технологических процессов и эффективности взаимодействия операций. Международный опыт показывает, что различия в подходах к выполнению опалубочно-бетонных работ приводят к заметному разбросу сроков. Так, платформа Draugen в Норвегии была возведена за 38 месяцев благодаря применению скользящей опалубки и непрерывного бетонирования, тогда как российские сооружения аналогичного класса строились в 1,5-2 раза дольше, даже при наличии доковой инфраструктуры [1,2]. Причина связана не с уровнем инженерных компетенций, а с недостаточной индустриализацией процессов, точнее отсутствием ритмичного потока, типовых карт бетонирования и оптимальных схем подачи смеси.

Опалубочные работы формируют темп строительства, а их оптимизация остается основным резервом повышения эффективности. Однако в различных странах подходы к организации строительного процесса и технологиям бетонных и опалубочных работ демонстрируют ряд отличий, оказывающих прямое влияние на продолжительность и эффективность возведения опор. На

основе проведенного анализа установлены критерии строительных работ с учетом срока возведения объекта (табл. 1).

Таблица № 1

Сравнительный анализ критериев строительства

Критерий	Зарубежная практика	Отечественный опыт
Производственная база	Индустриальные доковые комплексы, собственные бетонные узлы	Ограниченная индустриализация, зависимость от логистики
Опалубочные системы	Скользкие и модульные системы	Преимущественно крупнощитовые и разборно-переставные
Темп бетонирования	Непрерывный, поточный	Циклический, с технологическими паузами
Материалы	Композиты, расширенные добавки	Традиционный бетон с зимними модификаторами
Механизация	Автоматизированные комплексы подачи бетона	Частично механизированные операции
Климатический риск	Умеренные условия (Северная Европа, Мексиканский залив)	Арктика, штормовая сезонность
Сроки возведения оснований	3-5 лет (Гравитационное основание морской платформы)	5-8 лет (Гравитационное основание морской платформы и ледостойкая стационарная платформа (ЛСП))

Ключевым фактором, определяющим разницу в сроках строительства между зарубежными и российскими проектами, являются опалубочно-бетонные процессы, на долю которых приходится до 40-55 % всех строительных операций при возведении опорных оснований [3-5].

В международной практике эти процессы организованы по принципу поточного режима работы, где опалубка выступает не просто оснасткой, а частью производственной системы, интегрированной с графиком поставок бетонной смеси, арматуры и инженерного обеспечения (рис. 1).



а — скользящая опалубка

б — крупнощитовая опалубка

Рис. 1. Сравнение типов опалубочных систем, применяемых в морском строительстве: а - *скользящая опалубка (применяется в Норвегии и Канаде)*; б - *крупнощитовая опалубка (распространена в РФ)* (по материалам сайтов Borton Construction, <https://borton.net/slip-form-concrete> и АЛЬФАТЕХ Опалубка, <https://alfateh.su/radiusnaja-shhitovaja-opalubka/>)

В наших проектах аналогичный уровень ритмичности достигается лишь частично, что связано с отсутствием унификации опалубочных решений, зависимостью от погодных условий и недостаточной механизацией подъема и перестановки опалубочных комплексов [6,7]. Для сравнения, скользящая опалубка позволяет выполнять бетонирование непрерывно, со скоростью 2-4 м/сут, тогда как крупнощитовая опалубка обеспечивает лишь поэтажный темп 0,3-0,7 м/сут при многократных технологических перерывах [8].

Материально-технические ограничения связаны с недостаточным применением высокотехнологичных материалов, таких как бетоны повышенной прочности (В80-В100), бетоны на микрокремнеземе и композитная арматура, способные уменьшать массу опор и ускорять строительный цикл [9-10]. Вместо этого в ряде проектов используются традиционные бетонные смеси, требующие длительного выдерживания и тепловлажностной обработки, что снижает темпы ростовых работ.

Анализ патентных решений показывает, что инновационные технологические подходы в области строительства опор в России предлагаются, но не доходят до широкого внедрения.

В результате можно выделить одну острую проблему, связанную с существующими технологическими методами, а именно, отсутствием принятия перспективных опалубочных систем в качестве основных, при строительстве опор. Таблицы классификаций 2 и 3 сформированы по результату проведенного анализа.

Таблица № 2

Классификация применяемых материалов

Группа материала	Конкретные виды	Назначение в конструкции
Несущие	Армированный бетон, сталь	Гравитационные и каркасные основания
Прогрессивные	Преднапряженный бетон, Армированные волокнами полимерные композиты	Уменьшение массы, повышение долговечности
Формообразующие	Фанера, сталь, стеклопластик	Опалубка щитовая, скользящая, модульная
Изоляционные	Пеностекло, экструдированный пенополистирол	Теплозащита, защита от морской воды и промерзания

Вопрос сравнения опалубочных технологий при строительстве морских платформ сложнее, чем может показаться.

Основные показатели, по которым обычно оценивают технологию, связаны между собой, и изменение одного параметра почти всегда отражается на других.

Ускорение темпа работ нередко снижает качество поверхности бетона. Повышение точности сопряжений может увеличить трудоемкость. Улучшение геометрии приводит к росту энергозатрат.

Таблица № 3

Классификация технологических подходов

Подход	Технология	Преимущества	Ограничения
Традиционное поэтапное	Щитовая опалубка	Простота, доступность	Много швов, зависимость от климата
Непрерывное формование	Скользкая опалубка	Быстро, надежно, ровная структура	Сложность регулирования, дороговизна
Префабрикация и сборка	Модульные блоки	Высокое качество, короткий цикл монтажа	Логистика, точность соединения
Автоматизация/цифровизация	Роботизированная опалубка	Контроль качества, снижение брака и затрат	Требует цифровых моделей и квалификации

Для выбора оптимальной технологии требуется подход, учитывающий несколько параметров и устойчивость решения к изменению условий морского строительства. В основу схемы легли данные нормативных документов СП 63.13330.2018, СП 70.13330.2012, СП 28.13330.2017 и инженерные исследования [11-13]. Однокритериальная оценка дает высокую погрешность, поскольку параметры несопоставимы: прирост скорости бетонирования на 10 процентов и снижение дефектности на 1 процент имеют разный вес. Поэтому возникает необходимость приведения характеристик к какой-то общей шкале.

Для решения данной проблемы рассмотрена схема идеального и антиидеального решения, близкая методу предпочтения альтернатив по сходству с идеальным решением (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution - TOPSIS) и методу анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process - AHP).

Одним из преимуществ метода TOPSIS является универсальность его применения, а также то, что метод практически не имеет ограничений относительно исходных данных, что позволяет использовать его в адаптированном формате для показателей, характеризующих технологию устройства опалубки. Эффективность применения метода TOPSIS в задачах выбора технологических решений подтверждена результатами многочисленных исследований, в которых данный метод использовался для оценки строительных технологий, конструктивных решений и организационных схем производства работ. Особенно близким к применению данного метода оценки технологий являются работы [11–13], где применение адаптированной версии метода TOPSIS обеспечивает возможность количественного сравнения альтернативных технологических решений по совокупности разнородных критериев и их ранжирование по степени предпочтительности, что позволяет обоснованно выбирать наиболее эффективные варианты.

Видя значительные преимущества метода TOPSIS при решении задач многокритериального выбора технологических альтернатив, предлагается рассмотреть модель многокритериальной оценки эффективности опалубочных технологий, основанную на алгоритме TOPSIS [11–13].

С целью формирования адаптированной модели оценки эффективности опалубочных технологий проведен анализ работ, где применяется метод многокритериальной оценки [11–13]. На первом этапе авторами предлагается формирование перечня исследуемых технологий (это и щитовая опалубка, в нашем же случае, еще и скользящая опалубка), а также варианты с применением иных элементов. Далее для каждой технологии задается набор частных показателей X_{ij} , характеризующих ее свойства и сгруппированных по трем направлениям:

- а. технологические параметры процесса;

- б. показатели качества;
- в. точности выполнения работ;
- г. эксплуатационные;
- д. энергетические характеристики.

Поскольку выбранные показатели имеют различные размерности и различную направленность влияния на итоговый результат, в соответствии с методикой TOPSIS исходная матрица решений корректируется, что позволяет привести все параметры к безразмерному сопоставимому виду и обеспечить их сравнение в едином диапазоне значений от 0 до 1. Так, в формуле (1) приведено выражение для нормализации показателей с отрицательной направленностью, используемое в рамках классического алгоритма метода TOPSIS и адаптированное к условиям рассматриваемой задачи. Нормализация показателей выполняется в соответствии с классическим алгоритмом метода многокритериального принятия решений [12].

$$X_{norm} = \frac{X_{max} - X}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

где X_{max} и X_{min} задаются по принятым границам диапазона, что позволяет привести отрицательно направленные показатели к единому виду, где единица соответствует наиболее выгодному значению, а ноль к наименее предпочтительному.

Аналогичное преобразование применяется и к параметрам, улучшающимся при увеличении значения (формула 2) [12].

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

После нормировки показатели становятся сопоставимыми, но степень их влияния на результат остается разной. Изменение плотности бетона на 1 процент и изменение скорости сборки на 1 м² в час не равнозначны по инженерной значимости.

Чтобы устранить эту проблему, каждому параметру назначаются весовые коэффициенты w_i .

Их значения определялись на основе требований нормативных документов, выявленных факторов (таблица 1) и практических особенностей, отмеченных при анализе технологий из патентных материалов. Сумма весов принята равной единице.

После этого вычисляются взвешенные нормированные показатели, представленные как произведение соответствующих матриц (формула 3) [11,12].

$$v_{ij} = w_i \cdot X_{norm,ij} \quad (3)$$

Матрица показывает вклад каждого параметра в итоговую оценку. Однако необходимо определить, насколько рассматриваемая технология приближена к наилучшему сочетанию показателей.

Для этого выделяются два эталонных состояния.

Первое включает условное идеальное решение, где каждый показатель равен лучшему значению среди всех технологий.

$$v_i^+ = \max_j (v_{ij}) \quad (4)$$

Второе антиидеальное, где каждый показатель равен наименьшему.

$$v_i^- = \min_j (v_{ij}) \quad (5)$$

Далее вычисляется расстояние от технологии j до этих двух эталонов.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum (v_{ij} - v_i^+)^2} \quad (6)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum (v_{ij} - v_i^-)^2} \quad (7)$$

Расстояния показывают, насколько технология приближена к лучшему и насколько удалена от худшего состояния. Логика показателя основана на том, что эффективная технология должна стремиться к идеалу и удаляться от антиидеала [12].

Финальная оценка выражается коэффициентом относительной близости [11,12].

$$CI_j = \frac{D_i^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (8)$$

Полученное значение находится в пределах от нуля до единицы. Чем оно ближе к единице, тем более сбалансированным является вариант.

В результате анализа методических положений, представленных в работах [11, 13], а также в исследовании [12], установлено, что применение модели многокритериальной оценки на основе метода TOPSIS позволяет наиболее полно учитывать совокупное влияние всех взвешенных критериев и обеспечивать корректное сравнение альтернатив, различающихся по принципам функционирования, уровню технологической сложности и эксплуатационным характеристикам. Использование коэффициента относительной близости в составе модели многокритериальной оценки приобретает особую значимость при анализе технологий, применяемых в морском строительстве. Это позволяет учитывать повышенные требования к надежности, долговечности и устойчивости конструкций в условиях воздействия агрессивной морской среды, сложных климатических факторов и высоких эксплуатационных нагрузок, что обеспечивает обоснованный выбор технологических решений, от которых напрямую зависят безопасность, экономическая эффективность и срок службы морских сооружений.

Исследование показало, что результативность возведения опор определяется свойствами материалов и характером технологических операций, влияющих на долговечность, темп работ и устойчивость к климатическим нагрузкам. Различия в сроках строительства связаны прежде всего с организацией опалубочно-бетонных процессов, формирующих ритм работ и продолжительность ростовых циклов.

Рассмотренная схема позволяет объективно сравнивать технологии и выделять параметры, оказывающие ключевое влияние на эффективность.

Полученные выводы обосновывают необходимость развития опалубочных систем, механизации и применения прогрессивных материалов в морском строительстве.

Литература

1. Lee S. Application of AHP and Fuzzy AHP to Decision-Making Problems in Construction // 52nd ASC Annual International Conference Proceedings. - Provo, Utah : Associated Schools of Construction, 2016. P. 6-8.
2. Bazli M., Heitzmann M., Villacorta B., et al. Durability of tubular seawater sea-sand concrete and FRP hybrid structures: mechanisms and effective parameters // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 363. P. 1-16.
3. Михельсон Л. В., Ретивов В. Н., Соловьев С. Г. Заявитель, патентообладатель: ПАО «НОВАТЭК». Способ изготовления основания гравитационного типа. Патент РФ № 2771197 С1. Российская Федерация. МПК E02B 17/00. Дата подачи: 15.02.2022. Дата публикации: 28.04.2022. Бюл. № 13. URL: patenton.ru/patent/RU2771197C1.
4. Шапорин И. И., Гришанин А. Е. Заявитель, патентообладатель: ООО «БТ СВАП». Конструкция крепления свайной трубной опоры. Патент РФ № 2743549 С1. Российская Федерация. МПК E02D 5/24. Дата подачи: 14.10.2020. Дата публикации: 19.02.2021. Бюл. № 5. URL: patenton.ru/patent/RU2743549C1.
5. Бобрусов С. В., Ключков Д. П. Обзор опалубочных систем // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4109.
6. Антонов В. С., Горшков И. А., Трапезников Ю. М. Заявитель, патентообладатель: ЗАО «Новые подводные технологии». Ледостойкий

- буровой комплекс для освоения мелководного континентального шельфа. Патент РФ № 2382849 С1. Российская Федерация. МПК E21B 43/01. Дата подачи: 18.09.2008. Дата публикации: 27.02.2010. Бюл. № 6.
7. Красильникова О. А., Самусев И. П. Строительство основания буровой платформы в сухом доке порта Восточный // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3(2). URL: item.asp.id=23607143.
8. Речкина, К. Ю. Оптимизация монолитного строительства: выбор наиболее эффективной опалубочной системы на основе сравнительного анализа // Молодой ученый. 2025. № 14 (565). С. 52-56. URL: moluch.ru/archive/565/123897.
9. Набокова Я. С. Эффективные строительные материалы и способы возведения зданий // Инженерный вестник Дона. 2008. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96.
10. Шишкина, О.О. Высокопрочный бетон для композитных материалов. Вестник Криворожского национального университета. 2022. 20(1). URL: doi.org/10.31721/2306-5451-2022-1-54-42-46.
11. Seng H., Siregar P., Jevica J. Analytic hierarchy process-based decision-making framework for formwork system selection by contractors // Journal of Construction in Developing Countries. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 237-255.
12. Ertuğrul İ., Karakaşoğlu N. Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods for facility location selection // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. Vol. 39. P. 783–795.
13. Оганесян О. В. Формирование организационно-технологических решений с учетом многокритериальности при реконструкции железобетонных сооружений // Строительные материалы и технологии. 2019. № 3. С. 45-50.
-

References

1. Lee S. Application of AHP and Fuzzy AHP to Decision-Making Problems in Construction 52nd ASC Annual International Conference Proceedings. Provo, Utah Associated Schools of Construction, 2016. pp. 6-8.
2. Bazli M., Heitzmann M., Villacorta B., et al. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 363. pp. 1-16.
3. Mihel'son L. V., Retivov V. N., Solov'ev S. G. Zayavitel', patentoobladatel': PAO «NOVATEHK». Sposob izgotovleniya osnovaniya gravitacionnogo tipa. [Method for manufacturing a gravity-based foundation]. Patent RF № 2771197 C1. Rossijskaya Federaciya. MPK E02B 17/00. Data podachi: 15.02.2022. Data publikacii: 28.04.2022. Byul. № 13. URL: patenton.ru/patent/RU2771197C1.
4. Shaporin I. I., Grishanin A. E. Zayavitel', patentoobladatel': ООО «BT SVAP». Konstrukciya krepleniya svajnoj trubnoj opory. [Structure for fastening a tubular pile support]. Patent RF № 2743549 C1. Rossijskaya Federaciya. MPK E02D 5/24. Data podachi: 14.10.2020. Data publikacii: 19.02.2021. Byul. № 5. URL: patenton.ru/patent/RU2743549C1.
5. Bobrusov S. V., Klochkov D. P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4109.
6. Antonov V. S., Gorshkov I. A., Trapeznikov YU. M. Zayavitel', patentoobladatel': ZAO «Novye podvodnye tekhnologii». Ledostojkij burovoj kompleks dlya osvoeniya melkovodnogo kontinental'nogo shel'fa. [Ice-resistant drilling complex for shallow-water continental shelf development]. Patent RF № 2382849 C1. Rossijskaya Federaciya. MPK E21B 43/01. Data podachi: 18.09.2008. Data publikacii: 27.02.2010. Byul. № 6.
7. Krasil'nikova O. A., Samusev I. P. Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik. 2015. № 3(2). URL: item.asp.id=23607143.
8. Rechkina, K. YU. Molodoj uchenyj. 2025. № 14 (565). pp. 52-56. URL: moluch.ru/archive/565/123897.



9. Nabokova YA. S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2008. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96.
10. Shishkina, O.O. Vestnik Krivorozhskogo nacional'nogo universiteta. 2022. 20(1). URL: doi.org/10.31721/2306-5451-2022-1-54-42-46.
11. Seng H., Siregar P., Jevica J. Journal of Construction in Developing Countries. 2020. Vol. 25, No. 2. pp. 237-255.
12. Ertuğrul İ., Karakaşoğlu N. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. Vol. 39. pp. 783–795.
13. Oganessian O. V. Stroitel'nye materialy i tekhnologii. 2019. № 3. pp. 45-50.

Дата поступления: 3.12.2025

Дата публикации: 6.02.2026