УДК 725.74:624.016
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-121-133

# АКРИЛ И СТАЛЬ В КОНСТРУКЦИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ОКЕАНАРИУМОВ

***М.Р. Абаева, В.С. Семенов, Э.З. Тургумбекова***

*Аннотация.* В статье рассматриваются конструктивные и материаловедческие аспекты применения акрила и стали в современных океанариумах. Проанализированы физико-механические свойства литого акрила, определяющие его преимущества над силикатным стеклом, включая высокую ударную прочность, низкую массу, возможность термоформования и большую светопропускную способность. Представлены особенности использования стальных конструкций в качестве несущего каркаса океанариумов, обеспечивающих восприятие больших гидростатических нагрузок, перекрытие значительных пролётов и формирование сложных архитектурных объёмов. Рассмотрены актуальные технологии производства и монтажа акриловых панелей, методы герметизации, антикоррозионные решения для стальных элементов, а также мировые примеры реализованных объектов. Определены ключевые тенденции развития конструкции океанариумов, включая рост размеров панелей, совершенствование клеевых соединений, применение высокопрочных сталей и разработку композитных систем. Сделан вывод о том, что сочетание акрила и стали формирует основу инженерной архитектуры океанариумов XXI века.

*Ключевые слова:* акрил; сталь; конструкции океанариумов; акриловые панели; подводные тоннели; стальные каркасы; литой акрил; термоформование; коррозионная стойкость; прозрачные ограждения; архитектура океанариумов.

# ЗАМАНБАП ОКЕАНАРИУМДАРДЫН КОНСТРУКЦИЯЛАРЫНДАГЫ АКРИЛ ЖАНА БОЛОТ

***М.Р. Абаева, В.С. Семенов, Э.З. Тургумбекова***

*Аннотация.* Макалада азыркы океанариумдарда акрил менен болотту колдонуунун конструктивдик жана материал таануу аспектилери каралат. Куюлган акрилдин силикат айнегинен артыкчылыктарын аныктоочу физика-механикалык касиеттери, анын ичинде жогорку соккуга туруктуулугу, аз массасы, термоформалоо мүмкүнчүлүгү жана чоң жарык өткөрүү жөндөмдүүлүгү талданат. Чоң гидростатикалык жүктөмдөрдү кабыл алууну, олуттуу пролётторду жабууну жана татаал архитектуралык көлөмдөрдү калыптандырууну камсыз кылган океанариумдардын көтөрүүчү каркасы катары болот конструкцияларын колдонуунун өзгөчөлүктөрү сунушталган. Акрил панелдерин өндүрүү жана монтаждоо боюнча актуалдуу технологиялар, герметизациялоо ыкмалары, болот элементтери үчүн коррозияга каршы чечимдер, ошондой эле курулуп бүткөн объекттердин дүйнөлүк мисалдары каралат. Океанариумдардын конструкцияларын өнүктүрүүнүн негизги тенденциялары аныкталган, анын ичинде панелдердин өлчөмдөрүнүн чоңоюшу, желимдүү бириктирүүлөрдүн өркүндөтүлүшү, жогорку бышыктыктагы болотторду колдонуу жана композиттик системаларды иштеп чыгуу камтылган. Акрил менен болоттун айкалышы XXI кылымдын океанариумдарынын инженердик архитектурасынын негизин түзөт деген корутунду жасалган.

*Түйүндүү сөздөр:* акрил; болот; океанариумдардын конструкциялары; акрил панелдери; суу астындагы тоннелдер; болот каркастар; куюлган акрил; термоформалоо; коррозияга туруктуулук; тунук тосмолор; океанариумдардын архитектурасы.

# ACRYLIC AND STEEL IN THE STRUCTURES OF MODERN OCEANARIUMS

***M.R. Abaeva, V.S. Semenov, E.Z. Turgumbekova***

*Abstract.* The article examines the structural and material aspects of using acrylic and steel in modern oceanarium design. The study analyzes the physical and mechanical properties of cast acrylic that provide significant advantages over silicate glass, including high impact resistance, low weight, thermoplastic formability, and superior light

transmittance. The role of steel structures as the primary load-bearing framework is discussed, emphasizing their ability to withstand large hydrostatic pressures, span wide exhibition halls, and support complex architectural geometries. The article reviews current technologies for manufacturing and installing acrylic panels, sealing methods, corrosion protection strategies for steel components, and presents global examples of contemporary oceanarium projects. Key development trends are identified, such as the growth of acrylic panel dimensions, advancements in bonding technologies, adoption of high-strength steel grades, and integration of composite systems. The study concludes that the combination of acrylic and steel constitutes the fundamental engineering basis of twenty-first-century oceanarium architecture.

*Keywords:* acrylic; steel; oceanarium structures; acrylic panels; underwater tunnels; steel frameworks; cast acrylic; thermoforming; corrosion resistance; transparent enclosures; oceanarium architecture.

**Введение.** Современные океанариумы представляют собой уникальные инженерно-архитектурные сооружения, объединяющие принципы гидротехнического строительства, высоких технологий материалов и сложных пространственных конструкций. Увеличение масштабов экспозиций, рост объёмов водных резервуаров и стремление к созданию «эффекта погружения» требуют применения инновационных конструктивных решений, обеспечивающих одновременно высокую прочность, прозрачность, устойчивость к агрессивной морской среде и выразительность архитектурного пространства [1].

В конструкциях океанариумов XXI века акрил (полиметилметакрилат) и сталь выступают в качестве ключевых материалов. Акриловые панели обеспечивают создание крупногабаритных прозрачных ограждений, панорамных окон и подводных тоннелей. Это позволяет достигать высокой визуальной доступности и светопропускания при эксплуатации в условиях значительных гидростатических нагрузок. Стальные конструкции формируют несущий каркас зданий, обеспечивая перекрытие значительных пролётов, поддержку акриловых панелей и сопротивление комплексным нагрузкам, таким как вес воды, динамические воздействия от посетительских потоков и сейсмические нагрузки [2].

Достижения в технологиях производства литого акрила, высокопрочных сталей и гибридных сталежелезобетонных систем сформировали основу для разработки океанариумов нового поколения, позволяя реализовывать архитектурные решения, ранее ограниченные техническими возможностями. Комбинация указанных материалов является определяющей для конструктивной логики современных океанариумов, обозначая новое направление в архитектуре научно-выставочных комплексов [3].

**Актуальность** данного исследования обусловлена сразу несколькими факторами:

***1. Увеличение масштабов современных океанариумов.*** Объёмы крупнейших резервуаров достигают 20–30 млн литров, а габариты панорамных акриловых окон составляют 30–40 метров в длину при толщине свыше 60 см. Эти параметры диктуют необходимость разработки новых принципов конструирования светопрозрачных ограждающих и несущих систем.

***2. Повышенные требования к безопасности и надёжности.*** Океанариумы классифицируются как особо ответственные сооружения, поскольку потенциальное разрушение акриловой панели или элемента стального каркаса представляет угрозу для посетителей и обитателей. Данное обстоятельство обусловливает потребность в углублённом научном анализе применяемых материалов и технологий.

***3. Недостаточная систематизация накопленных знаний в области акрило-стальных конструкций.*** При активном использовании акрила и стали в строительной практике, научные публикации зачастую носят фрагментарный характер, что указывает на отсутствие комплексных исследований, интегрирующих материаловедение, анализ конструктивных схем и эксплуатационных аспектов.

***4. Интенсивное развитие производственных технологий.*** Современные методы изготовления акрила, включающие литьё, термоформование и высокопрочную склейку, а также достижения в области сталей (коррозионностойкие сплавы, цифровое моделирование каркасов) обеспечили технические возможности, недоступные два десятилетия назад.

***5. Практическая потребность в разработке инженерных рекомендаций.*** Активное проектирование новых океанариумов в мировом масштабе обусловливает необходимость предоставления научно обоснованных подходов к применению акрила и стали для профессионального сообщества.

**Цель исследования** заключается в комплексном анализе конструктивных и материаловедческих особенностей применения акрила и стали в современных океанариумах, включая их физико-механические свойства, инженерные преимущества, технологические возможности и ограничения, а также выявление того, как сочетание этих двух материалов определяет архитектурную выразительность, безопасность, долговечность и функциональность океанариумных сооружений нового поколения.

**Акриловые панели: свойства и применение.** Акрил – прозрачный и лёгкий пластик, давно ставший стандартом для крупных аквариумных панелей. Первые акриловые аквариумы появились в 1970-х годах, и с тех пор материал постоянно совершенствовался. Современный акрил значительно превосходит обычное стекло по прочности и весу: по одним оценкам, он примерно в 15 раз крепче традиционного стекла и заметно легче [4]. За счёт лучшей теплоизоляции акриловых стенок легче поддерживать комфортную тропическую температуру внутри – акрил «обеспечивает определённую степень температурной изоляции».

Ключевым свойством акрила является его пластичность и способность к формованию. Акриловые листы демонстрируют значительно большую пластичность по сравнению со стеклом, что способствует снижению риска разрушения и обеспечивает возможность изготовления панелей сложной конфигурации. Например, при строительстве Шанхайского океанариума (объем главного аквариума – 3,8 млн литров) был использован высококачественный китайский акрил, который, обладая повышенными показателями пластичности и прочности, эффективно выдерживал значительные нагрузки и позволял создавать панели комплексной формы. Применение данной технологии обеспечило возможность конструирования крупногабаритных туннелей, цилиндрических и купольных конструкций, а также панорамных аквариумов с изогнутыми поверхностями [4]. Кроме того, современные производственные процессы позволяют изготавливать акриловые плиты сверхвысокой толщины, достигающей десятков сантиметров, что является критически важным для обеспечения структурной целостности при содержании значительных объемов воды.

Преимущества акрила по сравнению со стеклом охватывают несколько ключевых аспектов.

*Во-первых,* акрил характеризуется высокой ударной вязкостью и прочностью, превышающей прочность обычного стекла примерно в 15 раз, что имеет решающее значение в условиях высокого гидростатического давления.

*Во-вторых,* его значительно меньшая удельная масса (в 4–10 раз легче стекла сопоставимой толщины) упрощает монтажные работы и уменьшает нагрузку на несущие конструкции.

*В-третьих,* современные марки акрила, такие как Plexiglas GS, демонстрируют высокую устойчивость к воздействию морской воды и биологических агентов, сохраняя свои эксплуатационные характеристики в агрессивных условиях.

*В-четвертых,* акрил обладает превосходной светопропускной способностью, примерно на 5–6 % выше, чем у стандартного оконного стекла, что обеспечивает точную передачу цветов и деталей подводного ландшафта.

Наконец, возможность термоформовки акрила, включающей нагрев материала до пластичного состояния с последующим охлаждением в формовочной матрице, позволяет получать панели разнообразных сложных форм, включая туннельные, цилиндрические и сферические конструкции.



Рисунок 1 – Литая стеновая УФ акриловая панель для аквариума, океанариума [5]

Акриловые панели представляют собой ключевой конструкционный материал для изготовления резервуаров океанариумов, что обусловлено их специфическими свойствами, делающими их предпочтительным выбором по сравнению со стеклом [4]. На рисунке 1 представлены основные характеристики акриловых панелей, применяемых в аквариумистике.

**Основные свойства акриловых панелей:**

- ***Механическая прочность и устойчивость:*** акриловые панели значительно превосходят стекло аналогичной толщины по прочности, выдерживая гидростатическое давление и механические воздействия (приблизительно в 17 раз); их устойчивость к образованию трещин и разрушению повышает безопасность эксплуатации крупномасштабных аквариумных систем.
- ***Оптическая прозрачность:*** высокое светопропускание акрила, достигающее 92 %, обеспечивает оптимальную визуализацию морских обитателей; материал сохраняет оптическую прозрачность на протяжении длительного периода эксплуатации без существенного пожелтения.
- ***Удельная масса и технологичность обработки:*** меньшая удельная масса акрила по сравнению со стеклом упрощает логистику и монтаж; высокая обрабатываемость позволяет изготавливать панели сложной геометрии и различных размеров.

**Преимущества акриловых панелей:**

- ***Масштабируемость:*** возможность производства крупногабаритных бесшовных панелей является критическим фактором для создания обширных смотровых окон в океанариумах.
- ***Гибкость формования:*** способность акрила к изгибу и формованию позволяет реализовывать разнообразные архитектурные и дизайнерские решения (рисунок 2). Панели могут быть эффективно соединены и герметизированы, обеспечивая надежную водонепроницаемость конструкции.
- ***Химическая инертность:*** акрил демонстрирует устойчивость к воздействию соленой воды и агрессивных химических реагентов, что способствует увеличению срока службы панелей и снижению потребности в регулярном обслуживании.

**Технические аспекты:**

- ***Толщина панелей.*** Толщина акриловых панелей варьируется в зависимости от размера танка и давления воды. Для больших океанариумных танков панели могут быть значительно толще для обеспечения безопасности.
- ***Склейка и герметизация.*** Для создания больших панелей акриловые листы могут быть склеены с использованием специальных клеевых составов, которые обеспечивают прочные и невидимые швы; герметизация стыков и швов осуществляется с помощью силиконовых герметиков, устойчивых к воздействию воды и ультрафиолета.
- ***Использование акриловых панелей толщиной в 300 мм в здании океанариума.***

*Главные смотровые окна:* акриловые панели используются для создания огромных смотровых окон, через которые посетители могут наблюдать за морскими обитателями.

*Туннели:* акриловые панели позволяют создавать подводные туннели, через которые посетители могут проходить, ощущая себя частью подводного мира.

Установка и фиксация изделия осуществляется с помощью строп. Прочность, несущая способность и долговечность акриловой конструкции во многом зависит от того, насколько точно выставлена панель относительно горизонтали и вертикали. Это особенно актуально для крупногабаритных панелей – они более гибкие, а потому нуждаются в качественном нивелировании [4].

Выравнивание положения выполняется посредством регулирования монтажных элементов в вертикальной и горизонтальной плоскостях с помощью отвеса и уровня. Для выравнивания уровня по вертикали используются дистансеры, изготовленные из жесткого и долговечного материала.

***Склеивание акриловых элементов.*** Это один из ключевых этапов монтажа акриловых изделий. Склейка двух или нескольких акриловых панелей требуется в том случае, если размеры остекления превышают габариты стандартного листа.

Без склеивания невозможно изготовить тоннельную конструкцию.

Сегменты соединяются между собой встык (рисунок 3).

***Герметизация пазов.*** Нижний паз, в который устанавливается акриловая панель, заполняется безусадочной смесью, которая при затвердевании приобретает необходимую жесткость. Такой подход позволяет обеспечить жесткость конструкции, сделать ее устойчивой и прочной. Правильно



Рисунок 2 – Изогнутая акриловая панель [6]

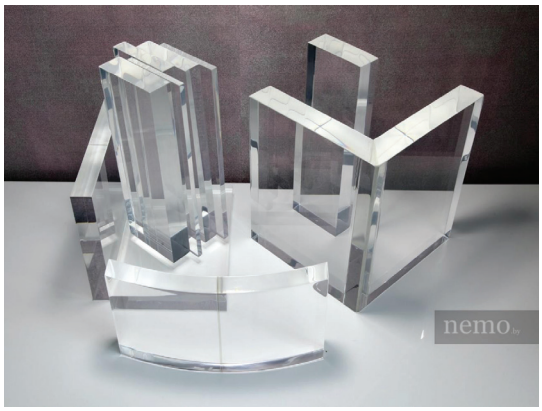



Рисунок 3 – Соединения акриловых панелей [7]




Рисунок 4 – Акриловая панель после шлифовки [9]

установленная панель гарантированно выдерживает огромное давление воды и не теряет своей несущей способности со временем.

В процессе эксплуатации акрил может подвергаться небольшому сжатию или расширению – эти перепады должны быть компенсированы. С этой целью со стороны верхнего и боковых торцев в местах примыкания акрила и бетонных пазов оставляются зазоры, которые заполняются пластичным материалом. Благодаря такой конструкции герметичность остекления остается неизменной на всех этапах эксплуатации. Пластичная прокладка компенсирует неровности бетонного основания и передает нагрузку от остекления к основанию. Пазы заполняются герметизирующим составом [8].

Чтобы защитить акрил от механических воздействий в процессе выполнения дальнейших отделочных работ, он покрывается щитами из плит на древесной основе.

Смонтированная конструкция надежно защищена от различных воздействий – теперь можно приступать к декоративной отделке. Места примыкания акриловых панелей к стенам тщательно очищаются и декорируются специальным покрытием, которое внутри танка служит защитой от воздействия агрессивной среды, а снаружи – выполняет эстетическую функцию.

После выполнения отделочных работ зазоры со стороны «сухой» зоны заполняются декоративным силиконовым герметиком. Далее защитный каркас снимается, акриловые панели и поверхности их сопряжения шлифуются (рисунок 4) с помощью эксцентриковой машины с абразивными насадками различной зернистости. Абразив смывается водой. Отшлифованный акрил подвергается полированию

с помощью полировальных паст. Обработанный таким образом акрил имеет абсолютную прозрачность и радует глаз кристально-чистым блеском.

Большие смотровые панели из акрилового стекла – один из самых эффектных элементов современного океанариума. Акрил (PMMA) практически полностью вытеснил силикатное стекло в крупных аквариумах благодаря меньшему весу, большей прочности и пластичности. Акриловые панели могут изготавливаться практически любой формы – плоские, сферические, цилиндрические, гнутые в двух направлениях. В химической промышленности на заводе можно отлить монолитный акрил толщиной до ~ 4–5 см.

Для получения панелей большей толщины используют технологию слоёного склеивания: несколько листов акрила склеиваются специальным прозрачным полимерным клеем в единый монолит [10]. Например, панель рекордного размера для Окинавы (22,5 × 8,2 м) состоит из ***14 слоёв акрила***, суммарной толщиной 60 см (рисунок 5). Важнейшая задача при этом – обеспечить оптическую прозрачность соединения и отсутствие видимых швов. Японская компания Nippura разработала клеевой состав, позволяющий добиться однородности панелей без искажений и помутнений. Даже при толщине ~ 60 см панели остаются кристально прозрачными – например, в Чурауми не наблюдается заметного желтоватого оттенка, характерного для толстого акрила. Панели доставляются на объект секциями (ограничения транспорта – обычно 5–8 м в длину), затем объединяются клеевым методом на месте. После вклейки панели в проём резервуара стык герметизируется эластичными герметиками для предотвращения протечек. Акрил обладает высокой стойкостью к воздействию воды и ультрафиолета, однако требует защиты от царапин; с внутренней стороны панели часто покрываются специальным прозрачным плёночным покрытием, которое можно заменить при износе.

Подводные тоннели – ещё одно конструктивное ноу-хау океанариумов. Тоннель позволяет зрителю пройти сквозь водное пространство, когда вода находится вокруг и над ним. Конструктивно тоннель выполняется из акриловых секций цилиндрической или эллиптической формы. Стандартный профиль тоннеля – часть цилиндра радиусом, обеспечивающим обзор 180° (полукупол над головой) (рисунок 6). Отдельные акриловые сегменты тоннеля имеют длину 2–3 м и соединяются на опорах с помощью фланцев или клея. Для компенсации гидростатического давления тоннель может иметь переменную кривизну: в нижней части, где давление выше, радиус кривизны несколько меньше, переходя к более пологой верхней части. Такая оптимизированная форма позволяет уменьшить нагрузку на акрил и тем самым использовать панели немного меньшей толщины без потери прочности. Однако слишком высокий свод тоннеля может снижать эффект присутствия, поэтому верх тоннеля стараются опустить ближе к посетителям, сохраняя при этом безопасный клиренс.

Подводные тоннели обычно опираются на прочный основание (фундамент или нижнюю плиту резервуара) и рассчитаны на вес воды над ними. Дополнительно учитываются сейсмические воздействия – конструкции тоннелей должны выдерживать возможное колебание уровня воды (эффект слошинга) при землетрясении. Современные тоннели имеют длину 20–40 м (в отдельных случаях до 60–70 м, как во Владивостоке). Герметизация стыков акриловых сегментов – слабое место тоннелей; для надёжности применяют дублирующие прокладки и регулярный мониторинг на утечки. Тем не менее при правильной эксплуатации тоннельные аттракционы безопасны и крайне популярны [10].

Посетители могут наблюдать плавающих над головой рыб и акул, находясь в прозрачном коридоре (рисунок 7). Акриловые тоннели проектируются с учётом гидростатического давления: в нижней части толщина стенок максимальна, а сверху – несколько меньше, благодаря чему материал используется эффективно. Такие конструкции создают у зрителя полную иллюзию нахождения на дне океана.

**Подводные тоннели** относятся к категории особо ответственных конструкций. К их изготовлению и монтажу предъявляются повышенные требования качества, надежности и безопасности. Для качественной формовки акриловых тоннелей изготавливаются специальные матрицы, уникальные для каждого типоразмера секции. Листовая заготовка (рисунок 8) укладывается на матрицу нужной конфигурации, нагревается в печи, становится пластичной и принимает форму матрицы. После

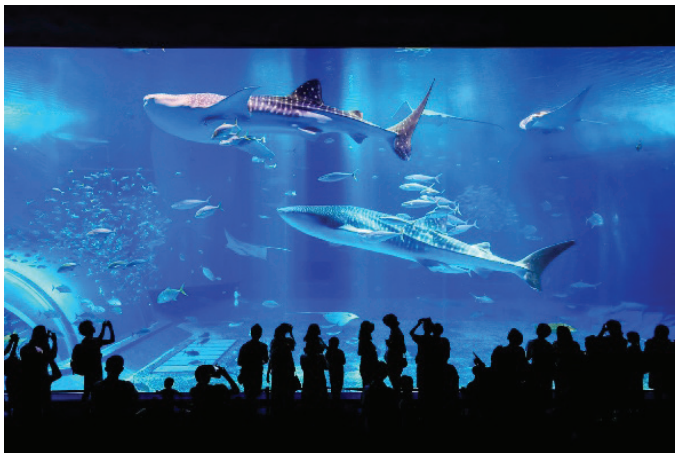


Рисунок 5 – Главный аквариумный резервуар «Море Куросио» в океанариуме Okinawa Churaumi (Япония). Огромная акриловая панель размером 22,5 × 8,2 м, толщиной 60 см (смонтирована из 14 слоёв) выдерживает давление 7,5 тыс. тонн воды. Через эту панорамную стену посетители наблюдают за китовыми акулами и скатами. Оптическое качество акрила настолько высоко, что его толщина практически незаметна для глаза [11]

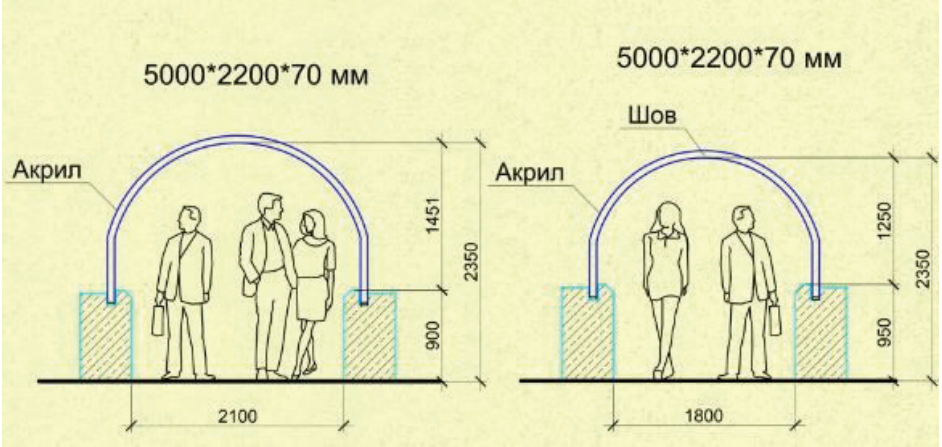



Рисунок 6 – Пример подводного тоннеля в экспозиции океанариума. Тоннель изготовлен из акриловых панелей цилиндрической формы с углом обзора ~180° [12]

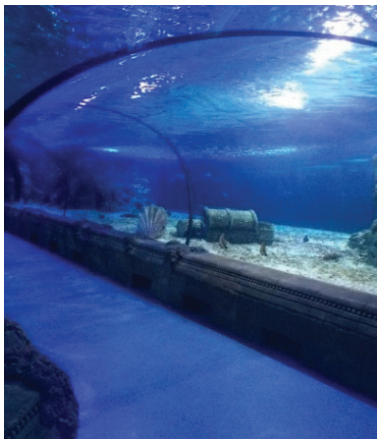


Рисунок 7 – Разрез подводного тоннеля [13]




Рисунок 8 – Лист акриловой панели [14]



Рисунок 9 – Секция подводного тоннеля из акрила [15]



Рисунок 10 – Конструкция подводного тоннеля [16]

остывания тоннельная секция (рисунок 9) восстанавливает свои механические свойства, приобретая прочность и жесткость (рисунок 10). Поверхность акрила подвергается полировке для обеспечения требуемой гладкости и оптических характеристик [10].

**Стальные конструкции** являются основным материалом для несущих каркасов океанариумов. Металлоконструкции обеспечивают способность выдерживать значительные эксплуатационные нагрузки и создавать крупнопролётные пространства без промежуточных опор. Отмечено, что «применение стальных конструкций при строительстве таких сложных объектов, как океанариумы, позволяет реализовывать самые смелые архитектурные решения». Например, несущий каркас Крокус-Сити Аквариума в Москве выполнен как многопролётная рамная конструкция, включающая стальные колонны и балки из двутаврового проката, произведенные из стали марок С255–С345 в соответствии с ГОСТ 27772. Жесткость данной системы достигается за счет применения жестких узлов и распорок. Дополнительно, некоторые колонны, расположенные в пределах аквариумных бассейнов, спроектированы как комбинированные железобетонные элементы, где стальной сердечник защищен бетонной обетонировкой и функционирует как единая композитная структура. Такой подход предотвращает коррозию и одновременно увеличивает несущую способность. Перекрытия аквариумов обычно делают из монолитного железобетона на профилированном настиле, соединённого со стальными балками болтовыми соединениями (ста́д-болты), что формирует комбинированную сталежелезобетонную конструкцию.

Преимущества стальных элементов в строительстве океанариумов:

- ***Надёжность и долговечность.*** Стальные колонны и балки выдерживают устойчиво большие длительные нагрузки воды. При необходимости используют качественные коррозионностойкие стали; в конструкциях, контактирующих с водой, применяют защитные покрытия или нержавеющую сталь.
- ***Проектная гибкость.*** Металлоконструкции легко проектировать в соответствии с любыми формами здания. Например, свод входного козырька Крокус-Сити Аквариума с вылетом 12 м выполнен именно из стали сложной формы.
- ***Скорость монтажа.*** Стальные каркасы позволяют сократить сроки строительства: при строительстве Крокус-Сити океанариума это дало рекорд – менее 2 лет от начала до сдачи объекта.

Недостаток – при прямом контакте с солёной водой обычная сталь ржавеет, поэтому требует антикоррозионной защиты. С этой целью бетонная обетонировка или лакокрасочные покрытия изолируют металл. Важно также обеспечить деформационные швы и системы сейсмоподвесок, поскольку водная нагрузка создаёт постоянные усилия на каркас (в отличие от временных нагрузок в обычных зданиях) [17].

**Технологии и перспективы.** Развитие технологий производства акриловых панелей и стальных конструкций идёт очень быстрыми темпами. В области акрила внедряются новые высокопрочные сорта пластика и методы формовки. Например, китайские производители разработали технологии изготовления «крупномасштабных сверхтолстых» акриловых плит – такие листы используются для гигантских резервуаров. Автоматизированные печи и станки для термоформования позволяют создавать матрицы практически любых размеров и форм. Постоянно совершенствуются составы акрила: добавки стабилизируют материал от жёлтизны, улучшают его стойкость к ультрафиолету и механическим нагрузкам.

Со стороны конструкционных решений появляются комбинированные системы. В упомянутом Крокус-Сити Аквариуме применена гибридная сталежелезобетонная схема – такую практику будет расти. Повышаются классы сталей и бетона, используются современные методы расчёта (например, BIM- и CAD-моделирование сложных форм бассейнов и соприкасающихся панелей). Вводятся новые способы соединения – вместо болтов всё чаще применяют сварку высокопрочных металлов, а поверхности балок из оцинкованной стали для бассейнов усиливают композитными покрытиями.

Что касается возможной замены акрила и стали в будущем, никаких принципиально новых материалов, полностью заменяющих эти гиганты, пока не появилось. В качестве альтернативных прозрачных материалов рассматриваются лишь стеклокомпозиты или полимерные ламинированные панели [18], но они существенно уступают акрилу по прозрачности и форме. Для несущих элементов иногда применяют углепластиковые или кевларовые композиты (они лёгкие и прочные), однако стоили бы очень дорого для таких объёмов и требуют сложной технологии изготовления. Таким образом, ближайшие годы развитие конструкций океанариумов будет происходить за счёт усовершенствования самих акрилов и стальных систем, а также интеграции «умных» технологий контроля качества (например, датчиков деформации или систем активной компенсации нагрузок).

**Сравнение инновационных решений в конструкциях.** В новейших проектах океанариумов прослеживается стремление к увеличению масштабов и сложности форм, что стимулирует появление инновационных конструктивных приёмов. Ниже приведены ключевые тенденции и примеры:

- ***Пространственные оболочки и геометрически сложные формы.*** Как отмечалось, использование криволинейных тонкостенных оболочек (тонкий бетон, усиленный стальной фиброй) позволяет создавать выразительные покрытия (пример – Валенсия, проект Candelaen). В рамках архитектурного проектирования аквариумов прослеживается развитие подходов, примером которого служит концепция Ozeanium в Базеле [19].

В этом проекте предлагается перекрытие главного зала куполом-оболочкой, которая воспринимает нагрузку от воды расположенного над ним аквариума. Подобная конфигурация, подразумевающая



Рисунок 11 – Проект «AquaDom» в Берлине [20]

размещение аквариума над уровнем посетителей, требует применения конструкций повышенной надежности, при этом создавая специфический визуальный эффект. Разрабатываются также концепции висячих аквариумов, где резервуар подвешивается к пространственным фермам потолка; примером такой реализации является проект «AquaDom» в Берлине (рисунок 11) [20], где цилиндрический аквариум опирался на потолочные фермы атриума.

Пространственные стержневые структуры, в том числе геодезические купола, применяются для павильонов, требующих перекрытия значительных площадей легкими конструкциями. В целом, пространственные конструкции позволяют эффективно сочетать требования к несущей способности с художественной выразительностью, что обусловливает их частое применение в проектах крупных океанариумов.

- ***Композитные и комбинированные конструкции.*** Интеграция материалов – тренд последних десятилетий. Помимо упомянутых металлобетонных систем (сталь + бетон), испытания проходят полимерные композиты: углепластиковые или стеклопластиковые профили. Они не ржавеют, легкие и прочные. В водных парках уже применяются перекрытия из стеклопластиковых балок с просвечивающими световыми окнами.
- Для океанариумов ***перспективно использование*** **FRP-арматуры** (стеклопластиковой) в стенах бассейнов – она абсолютно не подвержена коррозии, что повышает долговечность. Пока FRP арматура ограниченно используется из-за низкого модуля упругости, но для второстепенных элементов или в комбинации со стальной вполне возможна. Также рассматриваются самоисцеляющиеся бетоны с капсулами, выпускающими ингибиторы коррозии при образовании трещин – чтобы предотвращать повреждения от солёной воды. Эти технологии находятся на стадии исследований, но могут улучшить надёжность конструкций океанариумов будущего.
- ***Рекордные пролёты и панели.*** Каждое новое поколение океанариумов стремится превзойти предыдущее в масштабе. В 2000-х годах прорывом стали 8-метровые акриловые панели (Окинава, Атланта), затем 2010-е принесли панели 8,3 м высотой (Сингапур, Дубай, Чжухай). В 2020-х проектируется китайский комплекс Chimelong Spaceship [19] с резервуаром объемом более 75 млн л, где вероятно применены ещё более крупные панели. Инженеры овладели методами склейки акрила практически без ограничений по размеру, единственным сдерживающим фактором становится транспортировка и монтаж. Уже сейчас вес единой панели достиг 50–100 тонн, и для подъёма требуется спецтехника и усиленные проёмы. Применяются вакуумные присоски, плавучие краны (если монтаж с воды) и другие нововведения. Что касается пролётов покрытий – стальные фермы длиной 100 м уже не редкость в общем строительстве, и опыт будет переходить в сферу

океанариумов, особенно для размещения дельфинариев-арен. Возможно появление раскрывающихся структур (deployable structures), которые можно монтировать на земле и поднимать целиком, экономя время и повышая качество.

- ***Интеграция с другими сооружениями.*** Новые океанариумы всё чаще входят в состав многофункциональных комплексов – торгово-развлекательных центров, тематических парков, отелей. Это накладывает особенности на конструкцию. Например, Antalya Aquarium (Турция) находится под одним кровом с торговой галереей; там применены усиленные перекрытия, чтобы выдержать нагрузку от аквариумов на этаж ниже. В комплексе Chimelong [19] океанариум совмещён с театром и отелями, что требовало шумо- и виброизоляции: массивные фундаменты аквариумов отделены швами от лёгких конструкций аттракционов, чтобы не передавать вибрацию. Также наблюдается тренд к повышению энергоэффективности конструкций: установка на крышах солнечных панелей, применение теплоизоляционных материалов, рекуперация тепла из воды. Всё это должно учитываться конструктивно (кровли должны нести панели, стены – многослойные с утеплителем и т. д.). Например, в московском Москвариуме применены фасадные панели с повышенной теплоизоляцией для экономии энергии, а кровля рассчитана на снеговую нагрузку с коэффициентом 1,4 (учёт возможности скопления снега и льда, характерного для климата).

Таким образом, инновации в конструкциях океанариумов затрагивают широкий спектр направлений – от материалов (новые бетоны, композиты) до систем (пространственные, трансформируемые) и методов обеспечения безопасности. Ниже, в выводах, суммируются основные тенденции, определяющие развитие данной области.

**Выводы.** Проведённый анализ показал, что акрил и сталь формируют фундамент современных конструктивных решений океанариумов, определяя как инженерную надёжность сооружений, так и выразительность их архитектурного образа. Литой акрил обладает отличительным сочетанием механической прочности, оптической прозрачности и технологической пластичности. Это позволяет применять его при создании крупногабаритных панорамных окон, подводных тоннелей и светопрозрачных конструкций, что сложно реализовать с использованием силикатного стекла. Возможность изготовления акриловых панелей значительной толщины и их последующее бесшовное склеивание обеспечивает целостность и монолитность ограждающих поверхностей, в том числе при воздействии высоких гидростатических давлений.

Стальные конструкции служат универсальным средством для формирования несущих каркасов океанариумов. Их высокая прочность и способность создавать большепролётные пространства позволяют реализовывать сложные архитектурные формы, а также эффективно перераспределять нагрузки от массивных резервуаров с водой. Развитие технологий антикоррозионной защиты, разработка гибридных сталежелезобетонных элементов и применение высокоточных методов моделирования обусловливают статус стали как наиболее адаптивного и надёжного материала для сооружений, эксплуатируемых в морской среде.

Совместное применение акрила и стали создает взаимодополняющий эффект. Акрил обеспечивает прозрачность, эстетическую выразительность и возможность реализации сложных пространственных форм, в то время как сталь придает конструкциям структурную устойчивость, долговечность и безопасность. Такая конфигурация позволяет проектировать современные аквариальные комплексы, где инженерия и архитектура являются интегрированными компонентами. Это также закладывает основу для последующих исследований в области криволинейных оболочек, крупномасштабных аквариальных панелей и комбинированных несущих систем.

Результаты исследования демонстрируют, что отраслевые тенденции характеризуются увеличением масштабов акриловых конструкций, совершенствованием клеевых технологий, развитием композитных материалов и расширением возможностей цифрового проектирования. Эти факторы формируют условия для реализации проектов океанариумов с более сложной формой, увеличенной вместимостью и повышенной инженерной сложностью в перспективе ближайших десятилетий.

**Новизна и научная значимость.** Данное исследование систематизирует современные материалы и конструктивные решения, применяемые в океанариумах, учитывая научные достижения в областях материаловедения и инженерии. Анализ физико-механических свойств литого акрила и высокопрочных сталей выявляет взаимосвязи между технологией их изготовления и последующими эксплуатационными характеристиками панелей и несущих конструкций. Основной научный вклад исследования состоит в систематизации существующих данных. В частности, подтверждено превосходство акрила над стеклом по параметрам прозрачности и ударостойкости, а также показана возможность оптимизации стальных пространственных конструкций (например, оболочек, ферм, тоннелей) для реализации сложной архитектуры. Анализ мировых проектов (например, Okinawa Churaumi, The Blue Planet [21]) иллюстрирует практические достижения в области строительства океанариумов. Применение комбинации акрила и стали позволяет реализовать инженерные решения, которые ранее считались трудновыполнимыми или невозможными. Результаты исследований технологических процессов, таких как склейка и коррозионная защита, имеют существенное значение для повышения точности инженерных расчётов и материаловедческих моделей, используемых при проектировании океанариумов.

**Практическая ценность.** Результаты данной работы применимы в практике проектирования и строительства океанариумов. Информация о сравнительных характеристиках акриловых и стеклянных панелей, в частности об их массе и прочности, а также о методах герметичного соединения, является ключевой для инженеров при определении оптимальной толщины и геометрии конструктивных элементов с учётом объёма воды и требуемых пролётов. Разработанные рекомендации относительно применения стальных и комбинированных каркасов, включая аспекты коррозионной защиты и использования сейсмоподвесок, способствуют повышению надёжности и безопасности сооружений. Представленные данные о габаритах крупноразмерных акриловых панелей, включая примеры, такие как панель 22,5 × 8,2 м в океанариуме Okinawa Churaumi [21], а также сведения об особенностях их монтажа, предоставляют важные ориентиры для планирования логистики и применения соответствующей строительной техники.

Обзор современных материалов, таких как композиты и FRP (Fiber Reinforced Polymer), а также инновационных методов, включая BIM-моделирование и высокопрочную сварку, имеет практическое значение для специалистов, занимающихся проектированием океанариумов в составе многофункциональных комплексов. В совокупности данное исследование формирует комплекс инженерно-технических рекомендаций, направленных на повышение надёжности, долговечности и визуальной привлекательности современных океанариумов.

Поступила: 08.06.2026; рецензирована: 22.06.2026; принята: 24.06.2026.

***Литература***

1. *Тургумбекова Э.З.* Океанариум – уникальный научно-образовательный архитектурный объект / Э.З. Тургумбекова, М.Р. Абаева, Е.В. Конева // Архитектура и строительство России. Концепции. 2025. № 3 (255).
2. *Шикияма Т.* Разработка новых применений акрилового стекла / Т. Шикияма // Журн. Japan Spotlight. 2005. Март/апрель. С. 12–15.
3. Аквазар. Строительство океанариумов: технологии, конструкции, инженерные системы. М.: ООО «Аквазар», 2019. С. 68–96.
4. Reynolds Polymer Tech. Акриловые панели для океанариумов: технические характеристики и монтаж. Бишкек: Reynolds Inc., 2020. 18 с.
5. Литая стеновая УФ акриловая панель для аквариума, океанариума. URL: https://ru.zunhaiacrylic.com/cast-wall-uv-acrylic-panel-aquariumoceanarium.html (дата обращения: 01.12.2025).
6. Изогнутая акриловая панель. URL: https://ru.zunhaiacrylic.com/mirror-acrylic-curved-plastic-sheet-fish-tank-aquariums.html (дата обращения: 01.12.2025).
7. Соединения акриловых панелей. URL: https://acryl-art.ru/article/chto-takoye-akril (дата обращения: 01.12.2025).

8. AIC (Архитектурный институт Конструкций). Структура и инженерия аквариума в Анталье. Анталья, 2018. 5 с.
9. Акриловая панель после шлифовки. URL: https://www.xn--80aaasb6apcbmh6aeo.xn--p1ai/our_works/voronezhskij-okeanarium-stroitelstvo/ (дата обращения: 01.12.2025).
10. Nemo.by. Акриловое стекло. Прозрачные швы в аквариуме. URL: https://nemo.by/akrilovoe-steklo-prozrachnye-shvy-v-akvariume/ (дата обращения: 01.12.2025).
11. Главный аквариумный резервуар «Море Куросио» в океанариуме Okinawa Churaumi (Япония). Огромная акриловая панель размером 22,5 × 8,2 м, толщиной 60 см (смонтирована из 14 слоёв) выдерживает давление 7,5 тыс. тонн воды. Через эту панорамную стену посетители наблюдают за китовыми акулами и скатами. Оптическое качество акрила настолько высоко, что его толщина практически незаметна для глаза. URL: https://www.tripadvisor.ru/Attraction_Review-g1120808-d1151352-Reviews-Okinawa_Churaumi_Aquarium-Motobu_cho_Kunigami_gun_Okinawa_Prefecture_Kyushu.html (дата обращения: 01.12.2025).
12. Пример подводного тоннеля в экспозиции океанариума. Тоннель изготовлен из акриловых панелей цилиндрической формы с углом обзора ~180°. URL: https://www.xn--80aaasb6apcbmh6aeo.xn--p1ai/podvodnie-tonneli/ (дата обращения: 01.12.2025).
13. Разрез подводного тоннеля. URL: https://www.xn--80aaasb6apcbmh6aeo.xn--p1ai/podvodnie-tonneli/ (дата обращения: 01.12.2025).
14. Лист акриловой панели. URL: https://www.xn--80aaasb6apcbmh6aeo.xn--p1ai/podvodnie-tonneli/ (дата обращения: 01.12.2025).
15. Секция подводного тоннеля из акрила. URL: https://www.xn--80aaasb6apcbmh6aeo.xn--p1ai/podvodnie-tonneli/ (дата обращения: 01.12.2025).
16. Конструкция подводного тоннеля. URL: https://www.xn--80aaasb6apcbmh6aeo.xn--p1ai/podvodnie-tonneli/ (дата обращения: 01.12.2025).
17. Aquarium Art & Design. Акриловые аквариумы. URL: https://aquarium.lv/ru/acrylic-aquarium/ (дата обращения: 01.12.2025).
18. AkvaSteklo.ru. Акриловый материал и аквастекло. URL: https://akvasteklo.ru/stati/akrilovyi_matierial_i_akvastieklo (дата обращения: 01.12.2025).
19. ArchDaily. The Blue Planet (Denmark) / 3XN Architects. URL: https://www.archdaily.com/702330/the-blue-planet-slash-3xn (дата обращения: 01.12.2025).
20. Проект «AquaDom» в Берлине. URL: https://travelpost.in.ua/helpful-information/?ty=20&ci=761&page=1 (дата обращения: 01.12.2025).
21. Infosila.ee. Аквариум на Окинаве / Это вам не Maxima XX. URL: https://infosila.ee/main/412-akvarium-na-okinave-eto-vam-ne-maxima-xx.html (дата обращения: 01.12.2025).