

IV. НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

УДК 627.034

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ ИЗ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА НА ШЕЛЬФЕ КРУПНЫХ ВОДОЕМОВ

Ксенофонтова Т.К., Смолоногова В.С.

В статье рассмотрена расчетная модель здания из монолитного железобетона в условиях эксплуатации под водой на шельфе крупных водоемов. Расчетом с использованием ПК «ЛИРА-САПР» были определены минимальные размеры поперечных сечений несущих и ограждающих конструкций из условия трещиностойкости на основе сравнения максимальных значений мозаик главных растягивающих напряжений с расчетными сопротивлениями бетона на растяжение.

Ключевые слова: трещиностойкость, метод конечных элементов, расчетная модель подводного здания, гидростатическое давление воды.

ON THE ISSUE OF DESIGNING BUILDINGS MADE OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE ON THE SHELF OF LARGE RESERVOIRS

Ksenofontova T.K., Smolonogova V.S.

The article deals with the design model of a building made of monolithic reinforced concrete in the conditions of operation under water on the shelf of large reservoirs. The minimum cross-section dimensions of load-bearing and enclosing structures were determined using the LIRA-CAD calculation based on the comparison of the maximum values of the mosaics of the main tensile stresses with the calculated tensile resistances of concrete.

Keywords: fracture toughness, finite element method, computational model of the underwater buildings, the hydrostatic pressure of the water.

Подводный мир – уникальная среда, тем более она уникальна для строительства. В настоящее время одним из направлений развития научно-исследовательской, а также курортно-туристической сфер является освоение прибрежной и шельфовой зон морей, рек и крупных водоемов. Наблюдения за растительностью и обитателями подводного мира всегда вызывали интерес ученых и простых обывателей. Для этого в ряде стран были построены подводные здания различной формы и назначения [4, с. 103–106], например, подводные рестораны, отели, музеи, туннели, лаборатории. Примером может послужить подводный ресторан "Море. Огонь. Соль. Небо." на Мальдивах (рисунок 1), который состоит из четырёх этажей, на каждом из которых есть своя тематика и атмосфера.

Другим примером использования подводного пространства на шельфе может служить подводный музей скульптур "Муза", который находится на границе Мексиканского залива и Карибского моря, в мексиканском городе Канкун (рисунок 2). Все статуи этого музея сделаны из природных материалов, которые способствуют росту кораллов. По задумке скульпторов, все статуи должны в скором времени стать искусственным рифом.

Идея строительства на шельфе была реализована в разработанной и исследованной авторами конструкции здания, эксплуатируемого под водой, в котором люди могут проводить изучение жизни обитателей морей, рек и других крупных водоемов. Выполненная работа имеет свою актуальность, научную новизну и практическую ценность.

Актуальность настоящей работы заключается в том, что строительство на шельфе, в прибрежной зоне и на мелководных территориях обеспечивает реальный резерв развития, увеличение площади территорий для обитания человека, обладающих уникальными природными условиями.

Научной новизной является разработка конструкции и расчетной модели здания, эксплуатируемого в условиях подводной среды, исследование модели на современном программном комплексе «ЛИРА-САПР».



Рисунок 1. Ресторан "Море. Огонь. Соль. Небо." на Мальдивах

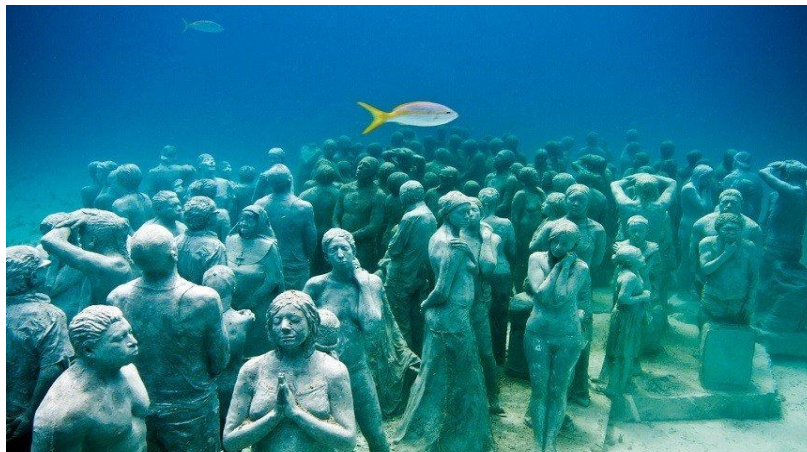


Рисунок 2. Подводный музей "Муза" в городе Канкун

Практическая ценность заключается в том, что определены минимально возможные размеры сечений несущих и ограждающих элементов конструкций, позволяющие работать зданию без образования трещин, за счёт чего повышается его надёжность и долговечность.

Рассмотренное подводное здание выполнено из монолитного железобетона при классе бетона В25 и представляет собой помещение с купольным покрытием длиной $L = 9$ м, шириной $B = 6$ м, высотой $H = 4,5$ м. Глубина воды над верхом купольного покрытия – 3 м. Марка бетона по водонепроницаемости была принята при максимальном градиенте напора по [1, с. 29], равной W8. Сверху здание покрыто гидроизоляцией. Для обеспечения необходимого температурно-влажностного режима помещения внутри здания пол был принят многослойным с гидроизоляцией.

В здание можно попасть по туннелю, который имеет выход на берег водоема. Размеры сечения туннеля в свету были приняты равными $b \times h = 1,75 \times 2$ м. Длина участка туннеля, учтенная в расчетной модели, определена на основе принципа Сен-Венана и составила 5 м, что соответствует примерно 2,5 размерам его высоты на внешнем контуре. На конце расчетного участка туннеля предусмотрены граничные условия в виде жесткого защемления по контуру сечения туннеля, которое ввиду необходимой удаленности от здания не оказывает влияния на его работу. Для построения расчетной модели приняты четырехузловые конечные элементы оболочки с размерами около $0,25 \times 0,25$ м. Для

наилучшего наблюдения за подводным миром в здании имеются оконные проёмы в продольных стенах, в торцевой стене, а также в покрытии (рисунок 3).

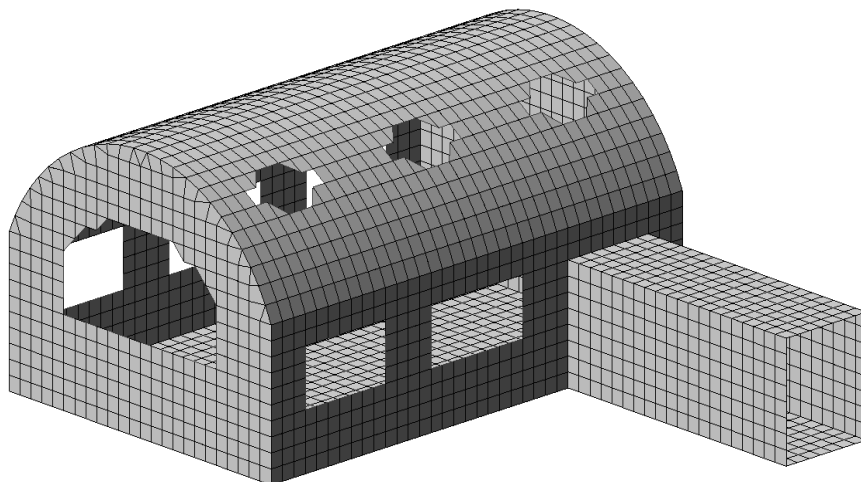


Рисунок 3. Модель подводного здания

Покрытие здания представляет собой арочную оболочку с первоначальной толщиной 200 мм, описанную по окружности. Такой тип покрытия был выбран для того, чтобы уменьшить в нём изгибающие моменты от действующего гидростатического давления воды. При создании модели покрытия вначале была построена арка с использованием стержневых конечных элементов, очерченная по окружности с радиусом $R = 3,25$ м, высотой $f = 2$ м и пролётом, равным ширине здания $B = 6$ м. При формировании арочной оболочки использовалась функция "ЛИРА-САПР" – "Перемещение образующей". Далее в оболочке были сделаны проёмы для окон (рисунок 4). Покрытие здания опирается на стены толщиной 250 мм, в основании находится фундаментная плита толщиной 400 мм.

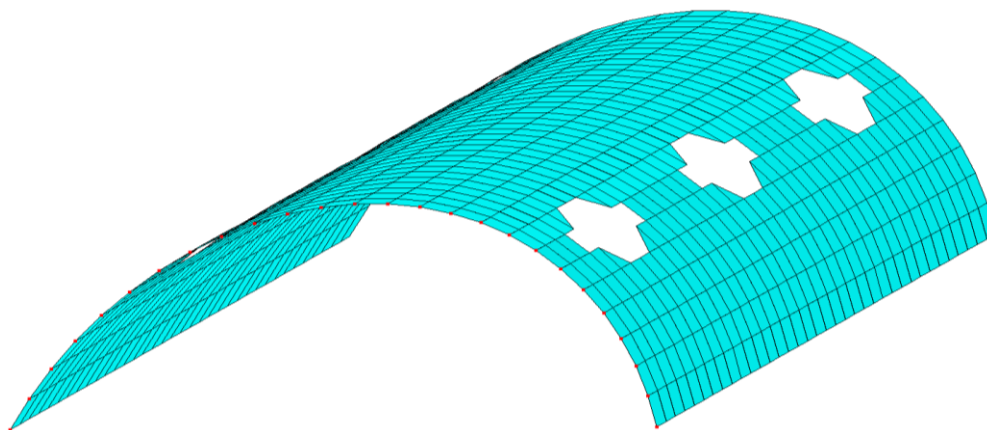


Рисунок 4. Арочная оболочка покрытия

При принятых размерах здание было проверено на всплытие. В результате было получено, что его устойчивость на всплытие не обеспечена. Поэтому под фундаментной плитой были предусмотрены сваи-стойки, надёжно забитые в прочный грунт и обеспечивающие анкерровку здания. Это моделировалось тем, что в узлах конечных элементов фундаментной плиты в местах расположения свай были предусмотрены связи по осям координат X , Y , Z .

После того, как была получена модель подводного здания, осуществлялся сбор нагрузок. При расчёте учитывались постоянные нагрузки: собственный вес здания, который задавался в автоматическом режиме "ЛИРА-САПР", вес покрытия пола, гидроизоляция на стенах и покрытии, гидростатическое давление воды; временные нагрузки, принятые по [3, с. 9] как для помещения административного назначения. Кроме того, в расчётах учитывалось сейсмическое воздействие при интенсивности 7 баллов, параметры которого принимались по [2, с. 5-7].

При эксплуатации здания под водой гидростатическое давление передаётся на все наружные элементы – покрытие, стены, включая фундаментную плиту, в виде равномерно распределённой нагрузки, направленной по нормали к поверхности (рисунок 5).

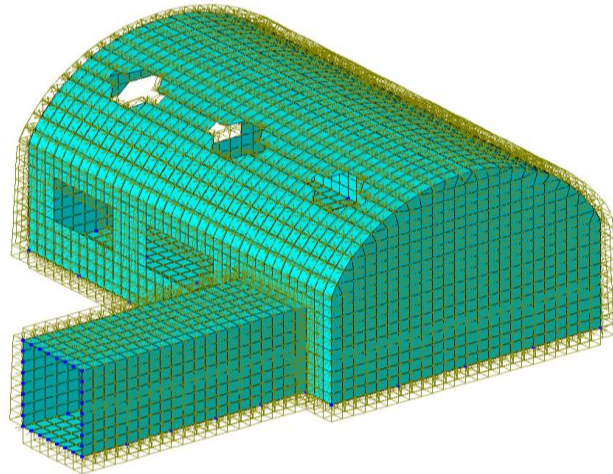


Рисунок 5. Нагрузка от гидростатического давления воды на здание-аквариум

Гидростатическое давление, которое приходится на окна здания, учитывалось в виде равномерно распределённой линейной нагрузки, которая задавалась по контуру оконных проёмов с помощью вспомогательных стержневых конечных элементов с нулевой жёсткостью (модуль упругости $E = 0$). Величина линейной нагрузки q_w определялась по формуле:

$$q_w = \frac{p_w \cdot A_0}{P_0}, \quad (1)$$

где p_w – среднее по высоте оконного проема гидростатическое давление воды, кН/м^2 ; A_0 , P_0 – площадь и периметр оконного проема.

Учет сейсмической нагрузки производился для двух направлений: поперёк здания вдоль оси OX , и в продольном направлении по оси OY . Предварительно было выполнено преобразование статических нагрузок, в результате которого с помощью соответствующих коэффициентов были собраны массы от действующих нагрузок для обоих направлений сейсмического воздействия. Нагрузка от гидростатического давления воды при сборе масс не учитывалась, так как вода для подводного здания является не собственно его нагрузкой, а средой, в которой оно находится.

В результате расчета на ПК «ЛИРА-САПР» от совокупности рассмотренных выше нагрузок для здания были получены внутренние усилия – распределение изгибающих моментов и напряжений: в поперечном направлении M_x , N_x , в продольном направлении M_y , N_y , а также распределение главных напряжений в сечениях σ_1 , σ_2 и σ_3 . На рис. 6 приведено распределение изгибающих моментов M_x , на рис. 7 – распределение изгибающих моментов M_y .

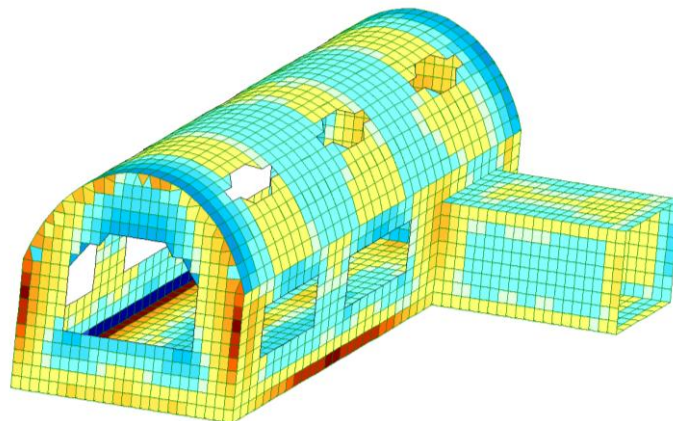


Рисунок 6. Распределение изгибающих моментов M_x в конструкциях подводного здания

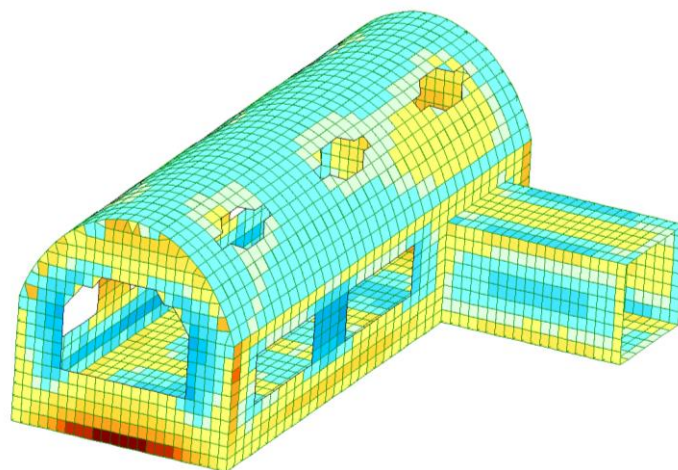


Рисунок 7. Распределение изгибающих моментов M_y в конструкциях подводного здания

Как видно из рисунков 6 и 7, наибольшие усилия в здании возникают в местах сопряжения покрытия со стенами и стен с днищем. Для того, чтобы сгладить пики усилий, можно предусмотреть в местах стыков покрытия, стен и фундаментной плиты вуты.

Диагностика возможного появления трещин в здании производилась по наибольшим главным напряжениям σ_1 , которое при отсутствии трещин не должно превышать предельного напряжения в бетоне на растяжение. Так как здание, эксплуатируемое под водой на шельфе водоемов является уникальным сооружением и его ремонт и реконструкция затруднены, то в качестве предельного напряжения на растяжение в бетоне принято его расчетное сопротивление R_{br} , которое определялось по [1, с. 78]. При классе бетона В25 величина $R_{br} = 1050 \text{ кН/м}^2$. На рисунке 8 показано распределение главных напряжений σ_1 . Наибольшие значения σ_1 составляют $\sigma_{1, \max} = 6,83 \text{ кН/м}^2$, что много меньше расчетного сопротивления бетона на растяжение R_{br} . Поэтому трещины в покрытии, стенах и фундаментной плите подводного здания не образуются и можно уменьшить их толщину.

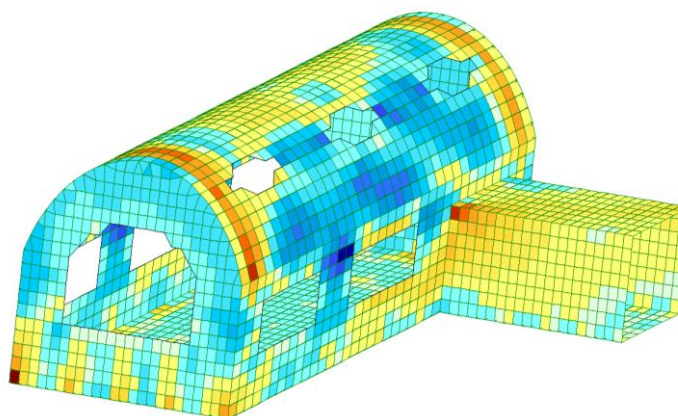


Рисунок 8. Распределение главных напряжений σ_1 в покрытии, стенах и фундаментной плите подводного здания

При анализе главных напряжений σ_3 (рисунок 9) видно, что практически во всем здании они являются сжимающими напряжениями, максимальное по модулю составляет $\sigma_{3, \min} = 24,2 \text{ кН/м}^2$, что много меньше расчетного сопротивления бетона на сжатие $R_b = 14500 \text{ кН/м}^2$, ввиду чего прочность бетона на сжатие обеспечена с большим запасом.

При дальнейшем расчете толщины покрытия, стен и фундаментной плиты были уменьшены до величин, обеспечивающих их водонепроницаемость и влажностный режим внутреннего помещения, а также удобных для размещения арматуры и бетонирования. Было принято для покрытия – 160 мм, стен – 200 мм, фундаментной плиты – 300 мм. При повторном расчете главные напряжения $\sigma_{1, \max}$ и $\sigma_{3, \min}$ также оказались много меньше расчетных сопротивлений бетона на растяжение и сжатие.

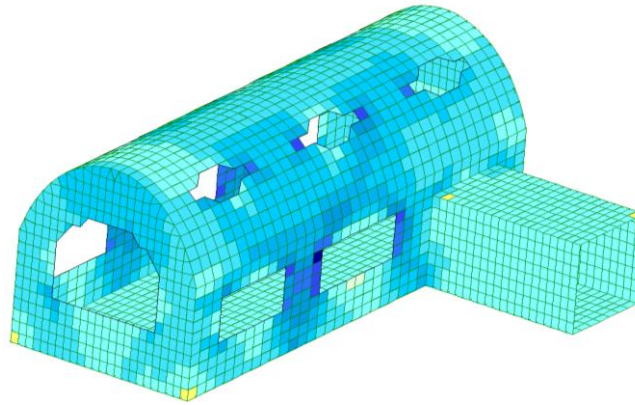


Рисунок 9. Распределение главных напряжений σ_3 в покрытии, стенах и фундаментной плите подводного здания

ВЫВОДЫ

1. Разработанная конструкция подводного здания позволяет создать сооружение на шельфе водоемов для проведения научных исследований и экскурсий по знакомству и изучению подводной флоры и фауны.
2. За счет куполообразного покрытия и обжатия здания гидростатическим давлением воды, в нем возникают сравнительно небольшие растягивающие напряжения, при которых не образуются трещины. Поэтому размеры сечений покрытия, стен и фундаментной плиты для небольших подводных зданий можно назначать из условий водонепроницаемости, комфортности пребывания во внутренних помещениях и производства работ.

Литература

1. Ксенофонтова Т.К. Инженерные конструкции. Железобетонные и каменные конструкции: Учебник / Т.К. Ксенофонтова, М.М. Чумичева; под общ. ред. Т.К. Ксенофонтовой. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 386 с.
2. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2018. – 115 с.
3. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* с Изменениями. Издание официальное. – М.: Минстрой России, 2019. – 92 с.
4. Тетиор А.Н. Полифункциональные территории, здания и сооружения: Учебное пособие. – М.: МГУП, 2008. – 314 с.

Данные об авторах:

Ксенофонтова Татьяна Кирилловна, доцент кафедры Инженерные конструкции, кандидат технических наук, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства.

E-mail: ksentanya@yandex.ru

Смолоногова Виктория Сергеевна, студент РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Российский государственный аграрный университет -МСХА имени К. А. Тимирязева

Ул. Большая Академическая, д. 44, Москва, 127550, Россия

Data about authors:

Ksenofontova Tatiana Kirillovna, associate Professor of the Department of Engineering structures, candidate of technical Sciences, Institute of land reclamation, water management and construction.

Smolonogov Viktoriya Sergeevna, student of the Russian state agrarian University-MTAA named after K. A. Timiryazev Institute of land reclamation, water conservancy and construction.

Russian state agrarian University named after K. A. Timiryazev.

Ul. Bolshaya Akademicheskaya, 44, Moscow, 127550, Russia.

Рецензент: Журавлева А.Г., доцент кафедры «Гидротехническое строительство», кандидат технических наук, Российский государственный аграрный университет имени К. А. Тимирязева, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства.