

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДОКОСТРОЕНИИ

А. С. Рашковский, проф., д-р техн. наук¹
Н. Г. Слуцкий, канд. техн. наук²

¹Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

²Херсонский государственный завод «Паллада», г. Херсон

Аннотация. Разработана технология строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы и практически неограниченных размеров, по которой производится бескассонное сращивание на плаву частей железобетонного понтона по длине и ширине без проведения подводно-технических работ.

Ключевые слова: плавучий док, понтон, железобетонные конструкции, расчет прочности, метод конечных элементов, бескассонное сращивание.

Анотація. Розроблено технологію побудови композитних плавучих доків великої підйомної сили і практично необмежених розмірів, за якою виконується бескасонне зрощування на плаву частин залізобетонного понтона по довжині та ширині без проведення підводно-технічних робіт.

Ключові слова: плавучий док, понтон, залізобетонні конструкції, розрахунок міцності, метод кінцевих елементів, бескасонне зрощування

Abstract. The technology of building the composite floating docks with large lifting capacity and practically unlimited sizes, which includes non-caisson splicing afloat parts of a ferro-concrete pontoon by length and breadth without underwater-technical works execution, is developed.

Keywords: floating dock; pontoon; ferro-concrete; construction; strength calculation; finite elements method; non-lacunal joining.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В связи с ростом дедвейта и размеров морских судов все большее применение в судоремонте находят плавучие доки большой подъемной силы. Наибольшее распространение получили цельнометаллические многопонтонные плавучие доки Х-образной формы, срок службы которых из-за коррозии не превышает 25...30 лет. На них с определенной регулярностью проводится ремонт собственных понтонов, во время которого доки не могут использоваться для докования судов. Поэтому в течение полного срока службы металлический док выводится из эксплуатации для самодокования примерно на 5 лет [1].

Наиболее востребованным современным типом дока является ремонтный композитный плавучий док большой подъемной силы, состоящий из железобетонного монолитного понтона и двух сплошных стальных башен. Композитные доки экономичнее цельнометаллических. Железобетонные понтоны практически не подвергаются коррозии в морской воде, что существенно снижает расходы на содержание дока и его ремонт. Применение железобетонных понтонов позволяет исключить вывод дока из эксплуатации для ремонта его корпуса, в результате чего эксплуатационные расходы композитного дока меньше примерно на 70%, чем у металлического, а срок его службы в 2,0...2,5 раза больше.

На постсоветском пространстве композитные железобетонные плавучие доки подъемной силой более 5000 т строит только Херсонский государственный завод (ХГЗ) «Паллада». Это уникальная и единственная в Украине железобетонная судостроительная верфь со специфической организацией и технологией строительства плавучих сооружений [1].

Специфика проектирования и технологии строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы потребовала решения ряда задач, не имеющих аналогов в мировой практике докостроения. В период с 1992 по 2006 г. были проведены научные исследования и опытно-конструкторские разработки, в результате которых созданы конкурентоспособные на мировом судостроительном рынке композитные плавучие доки и другие железобетонные плавучие сооружения отечественной конструкции, освоено их производство и осуществлено широкое внедрение.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — обобщение опыта совершенствования проектирования и технологии строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы и практически неограниченных размерений, позволяющих снизить их себестоимость, уменьшить продолжительность строительства и обеспечить конкурентоспособность отечественной продукции на мировом рынке судостроения.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

При проектировании композитных плавучих доков расчет прочности железобетонных конструкций понтонов выполнялся ранее по эмпирическим формулам в соответствии с [2] и не полностью отражал напряженно-деформированное состояние тонкостенных плит понтона. Проведенные исследования [3] показали, что при проектировании доков имеются резервы по снижению металлоемкости железобетонных конструкций понтона путем обоснованного уменьшения диаметра арматуры при условии обеспечения необходимой его продольной прочности. Для этого в расчетах прочности железобетонных кон-

струкций ступень-палубы и днища понтона должна быть использована более уточненная расчетная схема по сравнению с ранее применяемыми, учитывающая работу арматуры обоих направлений.

Впервые расчет напряженно-деформированного состояния железобетонных плит понтона при равномерном давлении был выполнен с использованием программного комплекса COSMOSWorks, ориентированного на проведение расчетного анализа конструктивно-однородных тел и представляющего собой систему расчетного анализа, полностью интегрированного с комплексом трехмерного моделирования SolidWorks. Последний обеспечивает возможность выгодно использовать графический интерфейс для получения модели исследуемого объекта и детализированных чертежей. Расчетный анализ в комплексе COSMOSWorks выполняется на основе метода конечных элементов (МКЭ), являющегося универсальным методом исследования сложных инженерных конструкций при различных условиях их нагружения [4, 5]. В упомянутом методе геометрическая модель тела условно разделяется на множество маленьких частей простой формы — конечные элементы (КЭ), взаимодействующие друг с другом в общих точках — узлах. Поведение каждого узла описывается некоторым числом параметров, определение которых является главной задачей МКЭ. По известным величинам узловых параметров можно оценить напряженно-деформированное состояние в каждом КЭ и исследуемого объекта в целом.

В программном комплексе COSMOSWorks для выполнения расчетов принята одна из основных разновидностей МКЭ — метод перемещений. За основные неизвестные, определяемые в первую очередь, принимаются перемещения узлов, в которых КЭ взаимодействуют друг с другом. В этих узловых точках прикладываются некоторые фиктивные усилия взаимодействия, характеризующие действие распределенных внутренних напряжений, приложенных вдоль реальных границ стыковки смежных элементов.

Необходимые для построения общей матрицы жесткости дискретной модели матрицы жесткости отдельных КЭ устанавливаются

связь между узловыми перемещениями и узловыми усилиями каждого КЭ, которая в матричном виде записывается как

$$\{R\} = [K]\{g\}, \quad (1)$$

где $\{R\} = \{R_{1x}, R_{1y}, R_{1z}, \dots, R_{nx}, R_{ny}, R_{nz}\}$ — вектор-стобец усилий в n узлах конечного элемента; $\{g\} = \{u_1, v_1, w_1, \dots, u_n, v_n, w_n\}$ — вектор-стобец узловых перемещений, соответствующих узловым усилиям; $[K]$ — матрица жесткости, которая, по существу, определяет упругие свойства рассматриваемого КЭ.

Проведенные исследования в части обеспечения оптимальной работы железобетонных элементов корпуса исходя из условий прочности на изгиб, кручение, водонепроницаемости и герметичности, позволили впервые в мировой практике докостроения получить необходимые комбинации тонкостенных элементов с минимальным использованием стали, что дало возможность сократить количество арматуры почти в 3 раза. Это обеспечило создание экономичной и уникальной конструкции дока с минимальными весом корпуса, осадкой и высотой борта.

С использованием зависимости Коши и закона Гука получена связь компонентов деформаций и напряжений с узловыми перемещениями конечного элемента:

$$\{\varepsilon\} = [D]\{q\};$$

$$\{\sigma\} = [E]\{q\},$$

где $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}$ — вектор-стобец деформаций; $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}$ — вектор-стобец напряжений; $[D]$ — прямоугольная матрица, элементы которой зависят от координат положения рассматриваемой точки; $[E]$ — прямоугольная матрица, элементы которой зависят от координат положения рассматриваемой точки и от упругих постоянных материала конструкции.

Рассматривая узловые усилия $\{R\}$ в качестве некоторых внешних сил, действие которых внутри КЭ вызывает напряженно-деформированное состояние, на основании принципа возможных перемещений получили

$$\{R\} = \left[\int_V [D]^T [E] dV \right] \{q\}; \quad (2)$$

$$[K] = \int_V [D]^T [E] dV, \quad (3)$$

где $[D]^T$ — транспонированная матрица координат в зависимостях Коши, интегрирование с которой выполняется по всему объему V конечного элемента, а матрица $[K]$ является квадратной, с порядком, равным числу степеней свободы тетраэдрического конечного элемента, т. е. тридцати. Она полностью определяет жесткостные свойства рассматриваемого КЭ. Формулы (2) и (3) раскрывают содержание составляющих в зависимости (1) для упругого тела.

Модель исследуемой железобетонной плиты выполнена в программном комплексе SolidWorks. Учитывая двойную симметрию плит стапель-палубы и днища понтона, расчет напряженного состояния выполняли для 1/4 части плиты, отмеченной на рис. 1 штриховкой. При этом в модели отражены арматура двух взаимноперпендикулярных направлений, а также бетон, работающий только на сжатие.

Фрагмент разбивки железобетонной плиты понтона дока на конечные элементы представлен на рис. 2. В месте расположения арматуры обоих направлений выполнено сгущение нанесенной сетки, что позволяет повысить точность определения напряженно-деформированного состояния в исследуемом районе плиты.

Получены результаты расчета приведенных напряжений в плитах стапель-палубы и днища понтона дока подъемной силы 25000 т, которые показали, что фактические коэффициенты запаса прочности, определенные по эмпирическим формулам, рекомендованным в [2], оказались завышенными — вместо принятой в проекте арматуры для плит стапель-палубы и днища диаметром 30 и 32 мм можно использовать арматуру меньших диаметров при сохранении толщин плит 170 и 180 мм.

На основе анализа возможности ремонта судов различных типов и размеров разработан конструктивный ряд композитных плавучих доков различной подъемной силы из унифицированных конструкций. Для создания такого ряда был определен док с

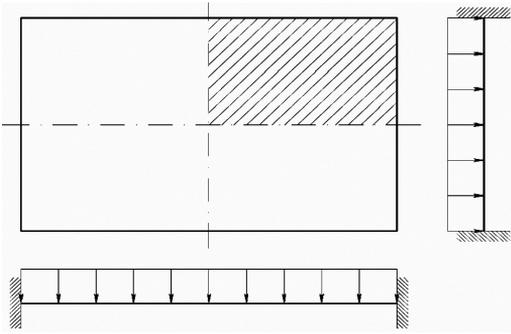


Рис. 1. Расчетная схема плит понтона дока

минимальной длиной, на котором можно рационально разместить все функциональные помещения и механизмы. При поступлении на завод заказа на док большей подъемной силы размеры (длина и ширина) основного дока могут быть увеличены с помощью дополнительных понтонов-приставок, которые срачиваются на плаву.

Разработана новая технология строительства композитных плавучих доков подъемной силой до 50000 т и практически любых размеров (длиной более 200 м, шириной более 50 м, высотой понтона до 7 м) из отдельных крупногабаритных частей, при которой основным способом строительства являются сборный метод формирования на стапелях док-камер частей железобетонного понтона из секций с последующим омоноличиванием стыков и блочный метод формирования башен дока. Повышение процента сборности (до 95 %) корпуса железобетонного понтона и блочное формирование башен дока позволяют перенести значительную часть работ в цехи и на предстапельную площадку, что существенно уменьшает объем стапельных работ, а также сократить общую продолжительность и трудоемкость строительства доков.

Для строительства доков на ХГЗ есть два построечных места — две док-камеры: большая — размером 150×32,5 м и малая — 150×18,5 м. Изготовление железобетонных понтонов доков производится полностью сборным методом из двух частей (полукорпусов) в большой и малой док-камерах с последующим омоноличиванием стыков и продольным (при необходимости

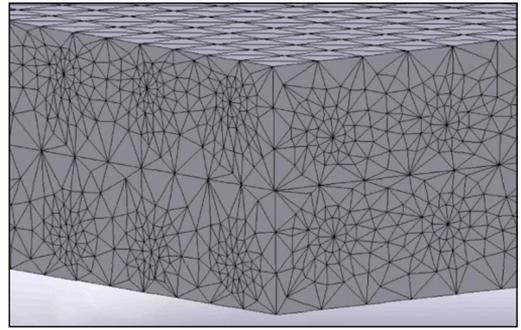


Рис. 2. Фрагмент разбивки железобетонной плиты понтона на конечные элементы

и поперечным) их срачиванием. Разделение понтона и башен на секции выполнено с учетом их максимальной унификации и ориентировано на крановое оборудование, обслуживающее док-камеры. Формирование железобетонных секций производят в универсальных металлических формах-матрицах с выдвигной разборной опалубкой. Разработанная оригинальная конструкция форм позволяет вынимать готовые изделия из опалубки механическим путем. Секции массой до 24 т изготавливают на бетоноформовочном участке корпусного цеха, секции массой больше 24 т — на стапеле в большой док-камере, а секции вертикальных элементов и железобетонные блоки понтона — на предстапельной площадке большой док-камеры. Формирование понтона выполняют на стапелях большой и малой док-камер от миделя в нос и в корму и от наружного борта к ДП (днищевые секции — от зоны разъема к наружным бортам — рис. 3).

На основе проведенных исследований и конструкторских разработок создано новое поколение современных композитных плавучих доков отечественной конструкции подъемной силой от 8500 до 30000 т, построенных на новой научной основе и отвечающих всем современным требованиям мирового рынка. Доки имеют автоматизированную систему управления механизмами, электронные системы определения уровня воды в балластных цистернах крена и дифферента, их прогиба при перегоне и эксплуатации, являются экологически более безопасными, чем их предшественники [6]. Разработаны

новые принципы организации и управления производством, математические модели процесса строительства доков [7]. Созданы и внедрены средства механизации трудоемких производственных процессов, в результате чего снижены трудоемкость и продолжительность строительства.

В результате проведенных исследований разработана уникальная технология бесконечного сращивания на плаву частей железобетонного понтона по длине и ширине практически неограниченных размеров без проведения подводно-технических работ [8, 9]. Конструктивно узел сращивания частей понтона дока на плаву состоит из плит днищевой обшивки, имеющей в районе стыка приливы, облицованные швеллерами, между которыми расположено эластичное уплотнение из профильной резины (рис. 4).

Устанавливают и закрепляют к достроечной набережной одну из частей дока, к ней



Рис. 3. Формирование дна железобетонного понтона на стапеле большой док-камеры

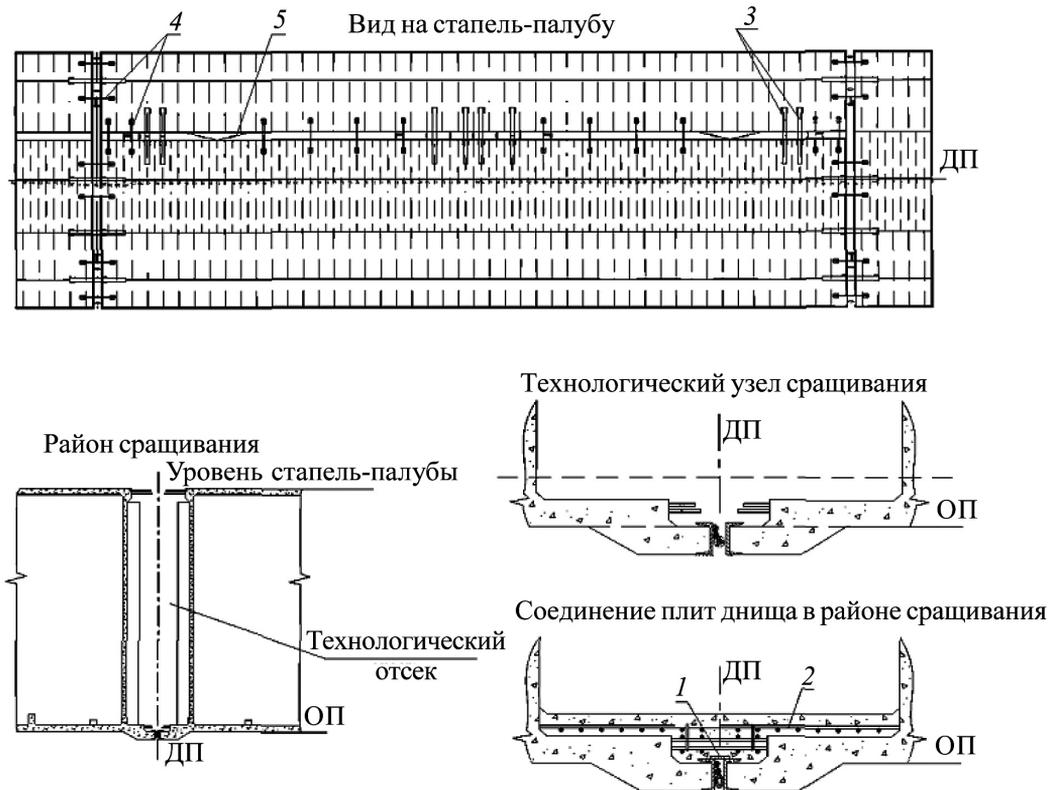


Рис. 4. Схема продольного сращивания полукопусов железобетонного понтона: 1 — металлическая полоса, герметизирующая район сращивания; 2 — арматурная сетка на стапель-палубе; 3 — парные центрующие балки с замковым соединением; 4, 5 — поперечные и продольные стяжки соответственно

пришвартовывают вторую. Пришвартованную часть понтона балластируют до получения незначительного крена в сторону части дока, закрепленной к набережной. Затем балластируют обе части понтона, пока они не примут проектное положение с учетом будущих смещений при проведении обжатия эластичного уплотнения.

Стыковку проводят до упора балок в замковых соединениях. Взаимное положение частей понтона регулируют с помощью поперечных и продольных стяжек. Для выполнения работ по сварке арматурных выпусков и бетонированию стыка в каждой из частей понтона предусмотрен специальный технологический отсек, который после стыковки превращается в единый отсек по всей длине [10]. Арматурный каркас стпель-палубы имеет выпуски на нижний ярус, которые при обжатии эластичного уплотнения образуют упругий шарнир, равномерно расположенный вдоль всего стыка.

Из технологического отсека полностью откачивают воду и уплотняют места в районе стыка с таким расчетом, чтобы осушительная система легко справлялась с появившимся фильтратом. Затем производят монтаж системы осушения и непрерывно удаляют фильтрационную воду из района стыка. После осушения технологического отсека армируют днищевые и торцевые стыки, сваривают арматурные выпуски, устанавливают опалубку, производят бетонирование и замоноличивание стыков.

Разработанный способ сращивания железобетонного понтона композитного плавучего дока на плаву требует минимальных затрат на герметизацию и выполнения небольшого объема осмотровых водолазных работ. Бескессонное сращивание на плаву понтона дока может быть как продольным, так и поперечным и выполнено на акватории ХГЗ или на месте его базирования. По этой технологии может быть изготовлен понтон практически для любых плавучих сооружений.

Разработанные новые материалы на основе модифицированного бетона для железобетонных конструкций обеспечивают их долговечность и значительно увеличивают продолжительность эксплуатации в мор-

ской воде. Применение таких решений выгодно отличает отечественную технологию строительства композитных плавучих доков от зарубежной. Разработанные новые технологии и построенные по ним доки не имеют аналогов в мировой практике докостроения.

Спроектированные и построенные композитные плавучие доки являются уникальными сооружениями. Они соответствуют классификационным Правилам Российского морского Регистра судоходства, а их характеристики обеспечивают возможность буксировки из порта г. Херсона на Дальний Восток, Камчатку, Кольский полуостров и в другие регионы Земного шара. Выполненные разработки обеспечили строительство и поставку заказчикам в 1992–2006 гг. 28 конкурентоспособных на мировом рынке композитных плавучих доков большой подъемной силы: в Российскую Федерацию, Японию, Южную Корею, Финляндию, Турцию, Болгарию, Вьетнам, Алжир, ОАЭ, Катар. В том числе для ВМФ Российской Федерации поставлены уникальные доки для утилизации атомных подводных лодок. Построенные на ХГЗ «Паллада» композитные плавучие доки различного назначения пользуются большим спросом во многих странах мира. Все это позволило Украине занять ведущее место и лидирующие позиции в мировой практике докостроения. Годовой экономический эффект от строительства композитных плавучих доков по новым технологиям составил 29,4 млн грн. Результаты выполненных научно-технических разработок отмечены Государственной премией Украины в области науки и техники 2007 г.

ВЫВОДЫ

Разработанные проектные и конструктивно-технологические решения и уникальная технология строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы и практически неограниченных размеров из отдельных крупногабаритных частей с последующим бескессонным сращиванием железобетонного понтона по длине и ширине на плаву, без подводно-технических работ не имеют аналогов в мировой практике докостроения. Технология может быть применена как на заводе-строителе доков, так и на месте их эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков: Монография / А.С. Рашковский, Н.Г. Слуцкий, В.Н. Конов, А.В. Щедролов, А.Н. Узлов; Под науч. ред. А.С. Рашковского. — Николаев: РАЛ-полиграфия, 2008. — 614 с.
- [2] Правила постройки корпусов судов и плавучих сооружений с применением железобетона. — К.: Регістр судноплавства України, 2007. — 120 с.
- [3] *Слуцкий Н.Г.* Оптимизация конструкции железобетонного понтона композитного плавучего дока // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2009. — № 2 (419). — С. 3–12.
- [4] *Постнов В.А.* Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. — Л.: Судостроение, 1974. — 334 с.
- [5] *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. — М.: Недра, 1974. — 240 с.
- [6] *Слуцкий Н.Г.* Новые направления в проектировании и технологии строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы // Матер. науч. симпоз. «Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации судов». — О.: Черноморье, 2008. — С. 18–23.
- [7] *Рашковский А.С., Слуцкий Н.Г., Кошкин К.В.* Методологические основы управления проектами строительства композитных плавучих сооружений: Монография. — Николаев: НУК, 2005. — 224 с.
- [8] *Слуцкий Н.Г.* Разработка технологии строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2007. — № 3 (414). — С. 3–10.
- [9] *Слуцкий Н.Г.* Сращивание на плаву частей железобетонного понтона композитного плавучего дока большой подъемной силы // Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований». — О., 2007. — Т. 1: Транспорт. — С. 18–22.
- [10] Патент № 7809 Україна, МПК В 63 В 9/00. Спосіб стикування підводних частин залізобетонної плавучої споруди / М.Г. Слуцький, В.Ф. Маломан. — Заявлено 17.11.04; Опубл. 15.07.05. — К.: Промислова власність, 2005. — № 7.