

http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140505  
 УДК 629.5.081.3  
 Р 28

## IMPROVEMENT OF STRENGTH CALCULATION OF STEEL-CONCRETE PONTOON OF COMPOSITE FLOATING DOCK

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПОНТОНА КОМПОЗИТНОГО ПЛАВУЧЕГО ДОКА

**Oleksandr S. Rashkovskyi**  
[olexandr.rashkovskyi@nuos.edu.ua](mailto:olexandr.rashkovskyi@nuos.edu.ua)  
 ORCID: 0000-0002-3730-3748  
**Leontii I. Korostylov**  
[leontyy.korostilyov@nuos.edu.ua](mailto:leontyy.korostilyov@nuos.edu.ua)  
 ORCID: 0000-0002-4370-3270  
**Dmytro V. Yermakov**  
[office@pallada.ks.ua](mailto:office@pallada.ks.ua)  
 ORCID: 0000-0002-7759-8819

**А. С. Рашковский,**  
 д-р техн. наук, проф.<sup>1</sup>;  
**Л. И. Коростылев,**  
 д-р техн. наук, проф.<sup>1</sup>;  
**Д. В. Ермаков,**  
 инж.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv

<sup>2</sup>Kherson State plant «Pallada», Kherson

<sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

<sup>2</sup>Херсонский государственный завод «Паллада», г. Херсон

**Abstract.** The main feature of steel-concrete pontoons of domestic composite floating docks with lifting force more than 8000 tones is that the better operation of concrete for strength during compression is used, and the transverse bulkheads are mounted on each frame instead of girder. It can significantly improve the exploitation dock characteristics because in this case the more free location of keel-blocks and crates on staple deck is provided and suitability of technique transportation that is used during repair is ensured. At the same time the pontoon with transverse bulkheads on each frame is stronger that the same with girders, that gives the basis of research of the ways for increase the thickness of steel-concrete structural elements with providing of overall longitudinal and transverse pontoon strength. The characteristic of calculation scheme for checking of composite floating dock overall longitudinal strength according to the regulatory document requirements has been given. The stress-strain state of steel-concrete plates for composite floating dock pontoon with application of COSMOSWorks software package is researched. The more precise settlement scheme for strength calculations of plates for staple-deck and bottom has been used compared with the previous applied one which took into account the work of both directed reinforcement. The results of calculation for dock pontoon with lifting force 25000 tones show that there is the opportunity to decrease the reinforce diameter compared with the designed that will lead to the reduction of the metal intensity of the steel-concrete structures of pontoon and as a result the prime cost of the dock.

**Keywords:** floating dock; steel-concrete pontoon; strength calculation; COSMOSWork software package; method of finite elements.

**Аннотация.** Дана характеристика расчетных схем проверки общей продольной прочности композитного плавучего дока в соответствии с требованиями нормативных документов. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных плит понтона композитного плавучего дока с применением программного комплекса COSMOSWorks. В расчетах прочности плит стапель-палубы и днища использована уточненная, по сравнению с ранее применяемыми, расчетная схема, учитывающая работу арматуры обоих направлений. Результаты расчетов понтона дока подъемной силой 25000 т показали возможность уменьшения диаметра арматуры по сравнению с проектной, что приведет к существенному снижению металлоемкости железобетонных конструкций понтона и, соответственно, себестоимости дока.

**Ключевые слова:** плавучий док; железобетонный понтон; расчет прочности; программный комплекс COSMOSWorks; метод конечных элементов.

**Анотація.** Наведено характеристику розрахункових схем перевірки загальної поздовжньої міцності композитного плавучого дока відповідно до вимог нормативних документів. Проведено дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних плит понтона композитного плавучого дока із застосуванням програмного комплексу COSMOSWorks. У розрахунках міцності плит стапель-палуби та днища використано уточнену порівняно з застосованими раніше розрахункову схему, враховуючи роботу арматури обох напрямків.

Результати розрахунків понтона дока піднімальною силою 25000 т показали можливість зменшення діаметра арматури у порівнянні з проектною, що приведе до суттєвого зниження металоємності залізобетонних конструкцій понтона та, відповідно, собівартості дока.

**Ключові слова:** плавучий док; залізобетонний понтон; розрахунок міцності; програмний комплекс COSMOSWorks; метод скінченних елементів.

#### REFERENCES

- [1] Zenkevich O.A., Chang I. *Metod konechnykh elementov v teorii sooruzheniy i v mekhanike sploshnykh sred* [Method of finite elements in the theory of structures and continuum mechanics]. Moscow, Nedra, 1974. 240 p.
- [2] Korostylev L.I., Klimenkov S.Yu., Slutskiy N.G. Raschet prochnosti zhelezobetonnykh konstruksiy pontona kompozitnogo plavuchego doka metodom konechnykh elementov [Calculation of strength of steel-concrete pontoon structures of composite floating dock by method of finite elements]. *Zb. nauk. prats NUK* [Collection of Scientific Publications NUS], 2009, no. 5, pp. 19–25.
- [3] Sintsov G.M. et al. *Konstruksiya i prochnost zhelezobetonnykh sudov* [Structure and strength of steel-concrete vessels]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1969. 215 p.
- [4] Varvak P.M. *Metod konechnykh elementov* [Method of finite elements]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 1981. 176 p.
- [5] *Pravila postroyki korpusov sudov i plavuchikh sooruzheniy s primeneniem zhelezobetona* [Construction rules of vessels hulls and floating structures using the steel-concrete]. Kyiv, Rehistr sudnoplavstva Ukrainy, 2007. 120 p.
- [6] Postnov A.V., Kharkhurim I.Ya. *Metod konechnykh elementov v raschetakh sudovykh konstruksiy* [Method of finite elements in calculations of vessel structures]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1974, 334 p.
- [7] *Pravyla klasyfikatsii ta pobudovy morskykh suden* [Classification and construction rules of seagoing vessels]. Kyiv, Rehistr sudnoplavstva Ukrainy, 2002. 362 p.
- [8] Rashkovskiy A.S., Slutskiy N.G., Konnov V.N., Shchedrolosev A.V., Uzlov A.N. *Proektirovanie, tekhnologiya i organizatsiya stroitelstva kompozitnykh plavuchikh dokov* [Construction designing, engineering and organization of composite floating docks]. Nikolaev, RAL-poligrafiya Publ., 2008. 614 p.
- [9] Slutskiy N.G. Optimizatsiya zhelezobetonnykh konstruksiy pontona kompozitnogo plavuchego doka [Optimization of steel-concrete pontoon structures of composite floating dock]. *Zb. nauk. prats NUK* [Collection of Scientific Publications NUS], 2009, no. 4, pp. 78–83.

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современные композитные плавучие доки отечественной постройки, у которых понтон железобетонный, а башни – стальные, имеют существенные отличия от зарубежных. Эти отличия проявляются в особенностях конструкции понтонов, плоские элементы которых имеют значительно меньшую толщину. Это связано с тем, что расчет железобетонных конструкций за рубежом основывается на строительных нормах, согласно которым каждый элемент конструкции работает самостоятельно и передает на соседний элемент только нагрузку от давления [3].

В соответствии с [6] расчет прочности при изгибе железобетонных конструкций отечественных доков выполняется с учетом совместной работы набора с присоединенным пояском обшивки (плиты). При этом расчетная ширина присоединенного пояса принимается равной полусумме прилегающих к ребру (стенке балки) пролетов плиты, но не более 20 толщин [6, п.1.1.24.3]. Учет присоединенных поясков в работе набора при его изгибе позволяет существенно уменьшить толщину железобетонных конструкций с минимальным использованием стали (арматуры) и не применять дополнительные подкрепления,

что обеспечивает создание экономичной конструкции понтона даже при использовании достаточно грубых расчетных схем.

Особенностью конструкций понтонов отечественных доков грузоподъемностью более 8000 т является то, что, используя лучшую работу железобетона на устойчивость при сжатии, на каждом шпангоуте вместо балок устанавливают поперечные переборки. Это позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики дока, так как в таком случае обеспечивается более свободное размещение кильблоков и клеток на стапель-палубе. К тому же обеспечивается удобное перемещение техники, используемой при ремонте судов. При этом понтон с поперечными переборками на каждом шпангоуте более прочный, чем такой же с балками, что дает основание искать пути снижения толщины элементов железобетонных конструкций при обеспечении общей продольной и поперечной прочности понтона.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** – оптимизация толщины железобетонных конструкций понтона композитного плавучего дока на основе уточненного расчета напряженно-деформированного состояния плит с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе COSMOSWorks.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Проверку прочности дока при общем продольном изгибе выполняют в наиболее опасных сечениях по его длине, т. е. в районе действия максимальных изгибающих моментов и перерезывающих сил, а также в местах изменения размеров и армирования связей, включенных в расчетное поперечное сечение. В соответствии с требованиями [7] расчетный изгибающий момент  $M$ , кН·м, определяют по формуле

$$M = -0,125q\Delta L_{\text{сн}} \left( 1 - \frac{3\varphi - 1}{2\varphi} \cdot \frac{L_c}{L_{\text{сн}}} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta$  – максимальная грузоподъемность дока, т;  $q = g\Delta/L_c$  – средняя величина погонной доковой нагрузки, кН/м;  $L_c$  и  $L_{\text{сн}}$  – длина докуемого судна и стпельпалубы дока соответственно, м;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\varphi$  – коэффициент полноты эпюры доковой массы, значение которого принимается в зависимости от типа докуемого судна и расположения машинного отделения [7, табл. 3.13.3.2.4], а также его длины.

При расчетах изгибающего момента  $M$  по формуле (1) длину  $L_c$  самого короткого судна принимают равной  $0,9L_{\text{сн}}$ , а самого длинного –  $1,3L_{\text{сн}}$ . К тому же следует иметь в виду, что при постановке в док длинного судна ( $L_c > L_{\text{сн}}$ ) док испытывает перегиб и продольные связи понтона сжимаются, а при постановке короткого док испытывает прогиб, при котором продольные связи понтона растягиваются. Поэтому при расчетах продольной прочности дока в первую очередь следует рассматривать наиболее опасный случай – растяжение продольных связей понтона.

Для определения продольных усилий и нормальных напряжений в опасных сечениях, где действует максимальный изгибающий момент, и в районе срачивания понтонов геометрические характеристики эквивалентного бруса рассчитывают без учета растяжения бетона (при прогибе дока) и с учетом сжатия бетона дока (при перегибе дока). При этом арматуру включают в поперечное сечение своей полной площадью, а бетон – условной площадью  $F'_6$ , определяемой уменьшением реальной умножением на отношение модуля упругости бетона  $E_c$  к модулю упругости стали  $E_s$ .

Проверку прочности продольных связей корпуса железобетонного понтона от общего продольного изгиба дока выполняют по условию

$$\frac{N_p}{N} \geq k, \quad (2)$$

где  $N_p$  – расчетная разрушающая продольная сила в сечении, пропорциональная пределу текучести материала арматуры  $R_{\text{сн}}$  и определяемая с учетом местного изгиба по зависимостям, приведенным в [2];  $N$  – продольная сила в арматуре днища железобетонной плиты понтона;  $k$  – коэффициент запаса, значение которого принимается по работе [6, табл. 1.19].

Продольную силу в арматуре  $N$  в условии (2) определяют по формуле, полученной на основании технической теории изгиба балок,

$$N = \frac{M}{W} \cdot F_a, \quad (3)$$

где  $M$  – изгибающий момент, рассчитанный по (1);  $W$  – момент сопротивления эквивалентного бруса днища понтона;  $F_a$  – площадь сечения арматуры продольного направления в днище понтона.

Расчетный продольный изгибающий момент  $M$  в кН·м при перегоне дока к месту эксплуатации в соответствии с [7] определяют как

$$M = 5,03k_w h_p B L_{\text{сн}}^2, \quad (4)$$

где  $k_w$  – коэффициент волнового изгибающего момента;  $h_p$  – расчетная высота волны, м;  $B$  – ширина дока, м.

Коэффициент  $k_w$  и высоту волны  $h_p$  в (4) рекомендуют рассчитывать по формулам

$$k_w = 7,93 \cdot 10^{-3} + 4,13 \cdot 10^{-3} (L_{\text{сн}} / B) - 0,125 (d_{\text{неп}} / L_{\text{сн}});$$

$$h_p = 10,9 - \left( \frac{300 - L_{\text{сн}}}{100} \right)^2 \text{ при } L_{\text{сн}} < 300 \text{ м,}$$

где  $d_{\text{неп}}$  – осадка дока на миделе при перегоне.

Однако действующими в настоящее время в Российском Морском Регистре судоходства руководствами по освидетельствованию судов в связи с перегонами объектов с немореходными образованиями (доков) балльность волнения ограничивается 5 баллами с высотой волны трехпроцентной обеспеченности  $h_{3\%} = 3,5$  м. Поэтому минимальный момент сопротивления эквивалентного бруса  $W_{\text{мин}}$ , необходимый для обеспечения прочности дока при океанской буксировке, практически всегда будет меньше такового, обеспечивающего продольную прочность при доковании судов. К тому же океанскую буксировку следует рассматривать как единичное явление с очень низким уровнем вероятности на протяжении всего эксплуатационного периода дока.

Таким образом, определяющим продольную прочность связей железобетонного понтона является условие (2), в котором продольная сила  $N$  рассчитывается по формуле (3) с учетом особенности работы бетона на растяжение и сжатие.

Не менее важна оценка прочности понтона в поперечном направлении. В соответствии с [7] для монолитных понтонов расчетные нагрузки, на основании которых определяют величины расчетных моментов  $M$  и перерезывающей (поперечной) силы  $Q$  для поперечных связей понтона, устанавливаются для случая постановки в док на центральную килевую дорожку судна массой, равной максимальной грузоподъемности дока  $\Delta$ . При этом граничную длину судов принимают такой же, как и в случае расчетов продольной прочности доков:

$$\text{для длинного судна } L_c = 1,3 L_{\text{сн}};$$

$$\text{для короткого } L_c = 0,9 L_{\text{сн}}.$$

Расчет железобетонных конструкций по несущей способности (прочности с учетом устойчивости, если это необходимо) в соответствии с [6] выполняют для сечений, нормальных (перпендикулярных) к продольной оси связи, а также для наклонных к оси сечений наиболее опасного направления. Условие прочности по нормальным сечениям имеет вид:

при действии изгибающего момента

$$M \leq M_u/k; \tag{5}$$

при действии продольной силы

$$N \leq N_u/k; \tag{6}$$

по наклонным сечениям

$$Q \leq Q_u/k_1, \tag{7}$$

где  $M$ ,  $N$  и  $Q$  – изгибающий момент, осевая и поперечная (перерезывающая) силы в сечении от принятой величины расчетной нагрузки соответственно;  $M_u$ ,  $N_u$  и  $Q_u$  – расчетные разрушающие момент, осевая сила в нормальном сечении и разрушающая сила в наклонном сечении соответственно;  $k$  и  $k_1$  – коэффициенты запаса, значения которых принимают по табл. 1.19 Правил [6].

Анализ данных этой таблицы показывает, что для постоянных нагрузок коэффициенты  $k = 1,6$  и  $k_1 = 2,2$ , когда причиной разрушения является достижение предела прочности бетона при сжатии  $R_b$

или достижение предела текучести арматуры  $R_{ен}$ . При этом в момент сопротивления поперечной связи, работающей на изгиб, включаются присоединенные пояски плит стапель-палубы и днища понтона. Расчетная схема для такой связи представлена на рис. 1.

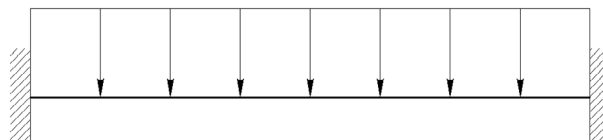


Рис. 1. Расчетная схема поперечной балки понтона дока

Очевидно, в опорных сечениях, т. е. на продольных связях понтона (вертикальном киле, стингерах), практически реализуются условия жесткого защемления, что подтверждается анализом поперечных сечений эксплуатирующихся доков подъемной силой от 8500 до 25000 т. Равномерный характер действующей нагрузки в большинстве случаев отражает реальные условия опасного нагружения. При этом опорное сечение поперечных связей будет наиболее напряженным и для него, в первую очередь, необходимо выполнять проверку прочности.

К обязательным расчетам следует отнести также оценку прочности на изгиб плит стапель-палубы и днища понтона при действии на них равномерно-го давления. Расчетная схема для такой конструкции представлена на рис. 2.

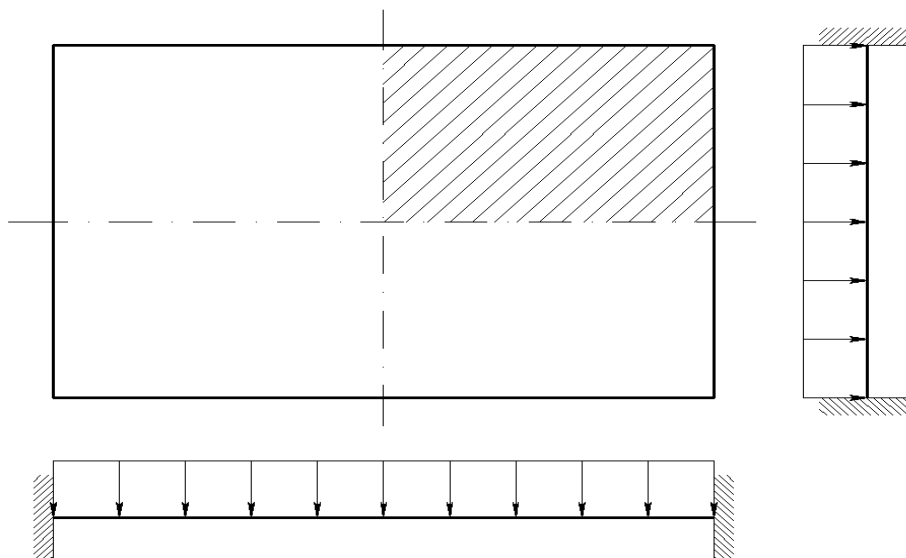


Рис. 2. Расчетная схема плит понтона дока

Жесткое защемление кромок плиты на жестком опорном контуре полностью отражает реальное деформирование плиты под действием нормального давления, учитывая неизменяемость шпации вдоль понтона и практически одинаковое расстояние между продольными связями понтона реальных доков. Максимальное значение предельного давления опре-

деляется уровнем воды при предельном погружении дока в случае отсутствия балласта в отсеке между поперечными и продольными связями понтона.

Анализ конструкций железобетонных понтонов композитных доков, спроектированных ЦКБ «Изумруд» и построенных на ХГЗ «Паллада», показал, что отношение сторон плит стапель-палубы

и днища в плане, как правило, не больше 1:5. Это подтверждено данными, приведенными в работе [8], а также представленной на рис. 3 схемой поперечного сечения композитного плавучего дока

подъемной силой 25000 т. Именно эта особенность была положена в основу выбора приближенного метода оценки прочности таких железобетонных плит.

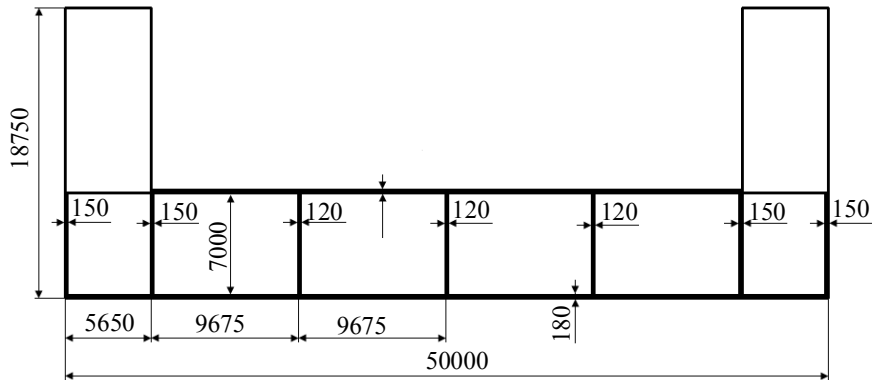


Рис. 3. Поперечное сечение композитного плавучего дока подъемной силой 25000 т

В соответствии с [6] для всех рассчитываемых на прочность элементов корпуса железобетонного понтона, в которых допускается образование трещин в бетоне, должна выполняться проверка на раскрытие трещин при действии постоянных или постоянных и случайных нагрузок. Эта проверка производится по условию

$$a_{cr} \geq [\Delta_{cz}], \quad (8)$$

где  $a_{cr}$  – расчетная ширина раскрытия трещин, определяемая в соответствии с указаниями в Приложении 2 Правил [6];  $[\Delta_{cz}]$  – допускаемая ширина раскрытия трещин, принимаемая по табл. 2.1.11 из [6] для конкретных конструктивных элементов корпуса понтона.

Анализ величин допускаемой ширины раскрытия трещин  $[\Delta_{cz}]$ , приведенных в упомянутой выше таблице, показывает, что в элементах, имеющих в сечении сжатую зону, их значение не меньше 0,08 мм, а со стороны несмачиваемых поверхностей – не менее 0,15 мм.

Выполненные ЦКБ «Изумруд» расчеты прочности спроектированных доков подъемной силой 8500 и 25000 т показали, что при принятых в проектах размерах конструкций железобетонного понтона (толщине плит, диаметре арматуры продольного и поперечного направлений) фактические коэффициенты запаса для большинства случаев превышают нормированные значения в условиях (5)–(7) на 20...40 %. При этом со значительным запасом для принятых марок бетона выполняется также условие проверки на раскрытие трещин (8).

Однако следует отметить, что проведенные расчеты базируются на достаточно приближенных гипотезах и допущениях, уточнение которых и применение новых методов расчета может привести к еще большему увеличению значений фактических коэф-

фициентов запаса. Например, расчет на изгиб железобетонных плит ступель-палубы и днища на равномерное нормальное давление выполнялся для полосы шириной 1 м, выделенной в средней части поля плиты вдоль ее короткой стороны. При этом не учитывалась арматура, расположенная поперек выделенной полосы [9].

Таким образом, для спроектированных доков имеются резервы по снижению металлоемкости железобетонных конструкций понтона путем обоснованного уменьшения диаметра арматуры при условии обеспечения необходимой продольной прочности дока и выполнении критерия (8) [9].

Расчет напряженно-деформированного состояния железобетонных плит понтона при равномерном нормальном давлении впервые выполнен с использованием программного комплекса COSMOSWorks, 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 программном комплексе COSMOSWorks выполняется на основе МКЭ, являющегося универсальным методом исследования сложных инженерных конструкций при различных условиях их нагружения [1, 4, 5]. При выполнении расчетов принята одна из основных разновидностей метода конечных элементов – метод перемещений. За основные неизвестные, определяемые в первую очередь, принимаются перемещения узлов, в которых конечные элементы взаимодействуют друг с другом.

Поскольку в качестве основных неизвестных приняты узловые перемещения, то их определение возможно после построения матрицы жесткости дискретной модели конструкции. Эта матрица



образуется из матриц жесткости отдельных конечных элементов (КЭ) бетона и арматуры и устанавливает связь между узловыми перемещениями дискретной модели и внешней нагрузкой исходной конструкции. Фактически она является результатом составления уравнений равновесия в узловых точках, которые представляют собой систему неоднородных алгебраических уравнений с неизвестными узловыми перемещениями.

Необходимые для построения общей матрицы жесткости дискретной модели матрицы жесткости отдельных КЭ бетона и арматуры устанавливают связь между узловыми перемещениями и узловыми усилиями каждого КЭ, которая в матричном виде записывается как

$$\{R\} = [K]\{q\}, \quad (9)$$

где  $\{R\} = \{R_{1x}, R_{1y}, R_{1z}, \dots, R_{nx}, R_{ny}, R_{nz}\}$  – вектор-столбец усилий в «n» узлах конечного элемента;  $\{q\} = \{u_1, v_1,$

$w_1, \dots, u_n, v_n, w_n\}$  – вектор-столбец узловых перемещений, соответствующих узловым усилиям;  $[K]$  – матрица жесткости, которая, по существу, определяет упругие свойства рассматриваемого конечного элемента.

Установление зависимости (9), т. е. определение матрицы жесткости  $[K]$ , возможно на основании предположения о характере изменения по объему элемента компонентов перемещений или напряжений. Для тетраэдрического конечного элемента с десятью узловыми точками (рис. 4), широко используемого при расчетах массивных тел, выражение, например, для перемещения  $u(x, y, z)$  вдоль оси  $x$  может быть представлено в виде

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6xz + a_7yz + a_8x^2 + a_9y^2 + a_{10}z^2. \quad (10)$$

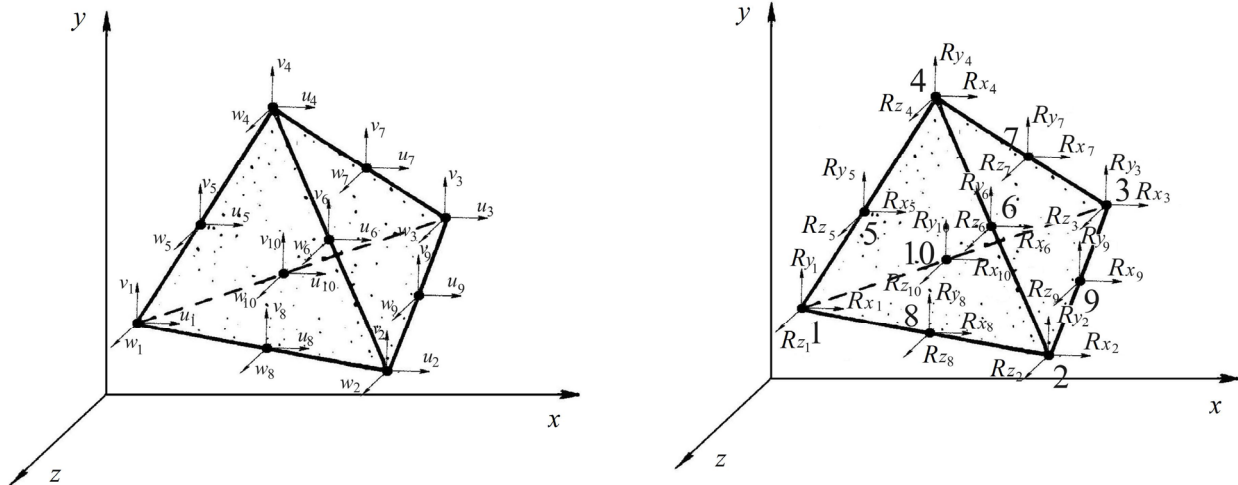


Рис. 4. Тетраэдрический конечный элемент с узловыми перемещениями (слева) и усилиями (справа)

По аналогии с (10) можно выписать выражения для перемещения  $y(x, y, z)$  и  $w(x, y, z)$  соответственно вдоль осей  $y$  и  $z$ . Тридцать произвольных параметров  $a_i$  в зависимостях для  $u, v, w$  могут быть выражены через вектор узловых перемещений, что позволяет представить этот вектор  $\{U\} = \{u, v, w\}$  в следующем виде:

$$\{U\} = [B]\{q\}, \quad (11)$$

где  $\{q\}$  – вектор узловых перемещений конечного элемента;  $[B]$  – прямоугольная матрица, элементы которой зависят от координат положения рассматриваемой точки.

Используя зависимости Коши и закон Гука, можно с учетом (11) получить связь компонентов деформаций и напряжений с узловыми перемещениями конечного элемента:

$$\{\varepsilon\} = [D]\{q\}, \quad (12)$$

$$\{\sigma\} = [E]\{q\}, \quad (13)$$

где  $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}\}$  – вектор-столбец деформаций;  $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}\}$  – вектор-столбец 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 конечного элемента – бетона или стальной арматуры.

Рассматривая узловые усилия  $\{R\}$  в качестве некоторых внешних сил, действие которых внутри конечного элемента вызывает напряженно-деформированное состояние, описываемое зависимостями (12) и (13), на основании принципа возможных перемещений можно получить:

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

$$[K] = \int_V [D]^T [E] dV,$$

где  $[D]^T$  – транспонированная матрица координат в зависимостях Коши (12), интегрирование с которой выполняется по всему объему  $V$  конечного элемента, а матрица  $[K]$  – квадратная с порядком, равным числу степеней свободы тетраэдрического конечного элемента, т. е. тридцати. Она полностью определяет жесткостные свойства рассматриваемого конечного элемента бетона либо арматуры.

Для определения неизвестных узловых перемещений дискретной модели  $\{q\}$ , которые представлены в общей системе координат, составляются уравнения равновесия для каждого узла дискретной модели с учетом параметров внешней нагрузки, условий закрепления данного узла и исключения перемещений конструкции как жесткого целого. При этом внешняя нагрузка должна быть приведена к узловому виду.

После исключения узловых усилий конечных элементов из уравнений равновесия с помощью матриц жесткости отдельных элементов и наложения кинематических связей на дискретную модель получается система неоднородных алгебраических уравнений с неизвестными узловыми перемещениями. Эта система в матричном виде имеет вид

$$[K]\{q\}=\{F\}, \quad (14)$$

где  $[K]$  и  $\{F\}$  – общая матрица жесткости и вектор внешних узловых усилий для всей дискретной модели в общей системе координат соответственно.

Общая матрица жесткости  $[K]$  уравнения (14) имеет ленточную структуру [1, 4, 5]. Ее решение для исследуемой дискретной модели выполняется по стандартной программе пакета COSMOSWorks.

После определения перемещений узлов деформации и напряжения могут быть определены соответственно по зависимостям (12) и (13). Тогда приведенные (эквивалентные) напряжения, необходимые для

проверки условия прочности, можно вычислить по любому критерию, например энергетическому критерию Мизеса.

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 штриховкой на рис. 2. При этом в модели отражены арматура двух взаимно перпендикулярных направлений, а также бетон, работающий только на сжатие.

Рассчитываемая конструкция железобетонной плиты, например днища понтона, разделена на 313897 конечных элементов тетраэдрической формы и образует 447028 узловых точек при базовой высоте тетраэдра  $\approx 30$  мм. На рис. 5 представлен фрагмент разбивки железобетонной плиты понтона дока на конечные элементы. В месте расположения арматуры обоих направлений выполнено сгущение нанесенной сетки, что позволяет повысить точность определения напряженно-деформированного состояния в исследуемом районе плиты.

На рис. 6–9 представлены результаты расчета приведенных напряжений в плитах стапель-палубы и днища понтона дока подъемной силой 25000 т. Выполненные расчеты [2] показали, что фактические коэффициенты запаса прочности, полученные эмпирическим путем, оказались несколько завышенными – вместо принятой в проекте арматуры для плит стапель-палубы и днища диаметром 30 и 32 мм можно использовать арматуру меньших диаметров при сохранении толщины плит 170 и 180 мм:

для стапель-палубы – арматуру диаметром 20 мм в продольном и 22 мм в поперечном направлении;

для днища – арматуру диаметром 20 и 22 мм в продольном и 25 мм в поперечном направлении.

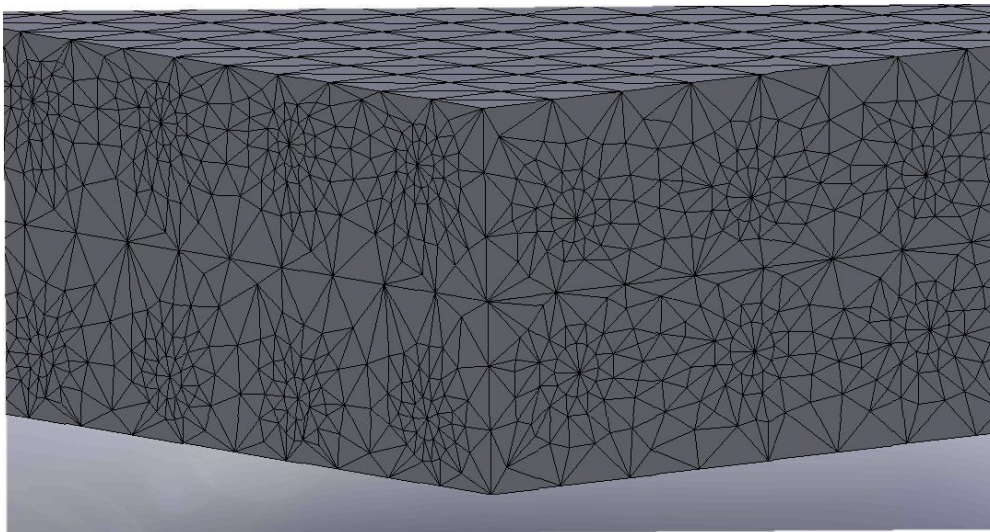


Рис. 5. Фрагмент разбивки железобетонной плиты понтона на конечные элементы

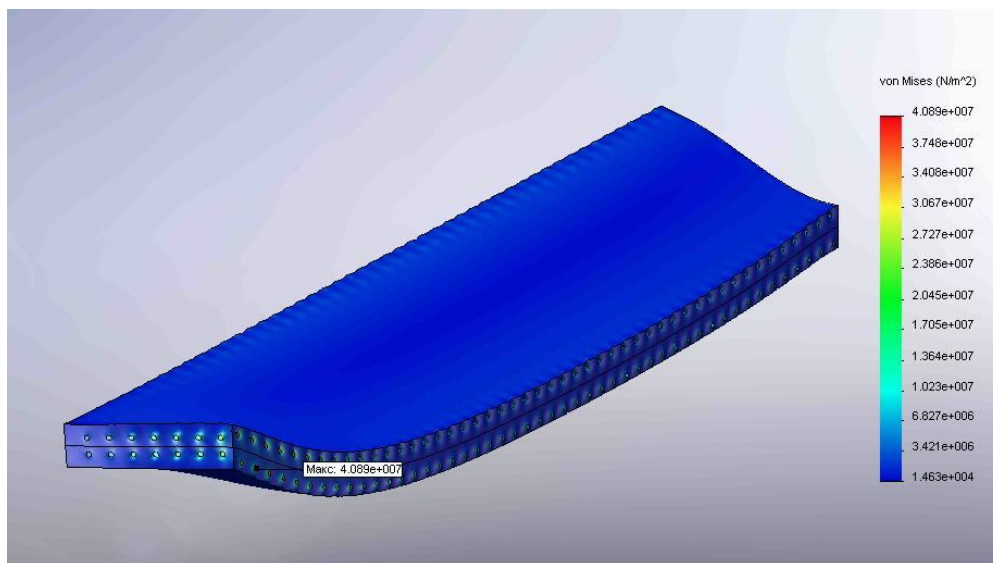


Рис. 6. Распределение приведенных напряжений в железобетонной плите стапель-палубы композитного дока

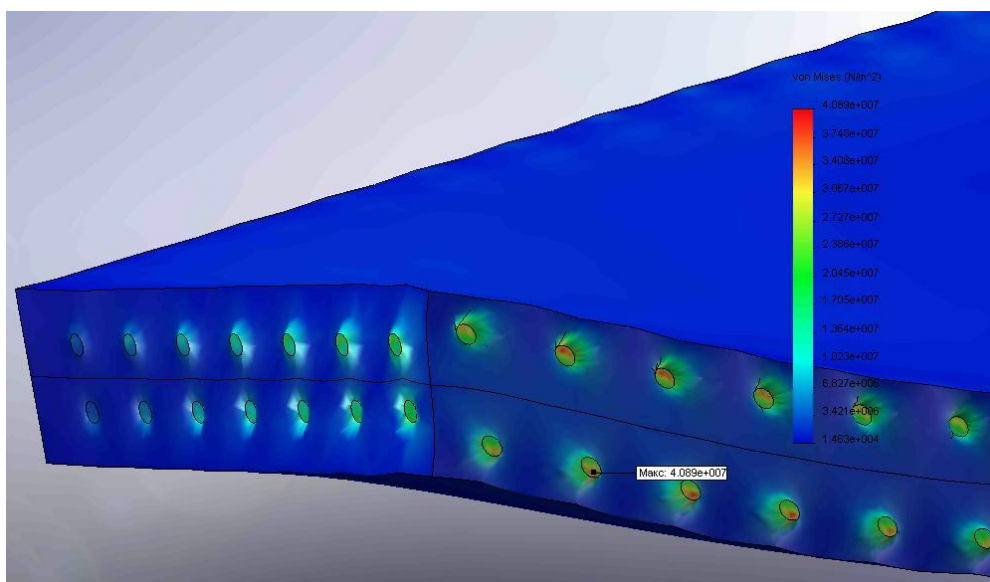


Рис. 7. Фрагмент поля напряжений в опасной зоне плиты стапель-палубы

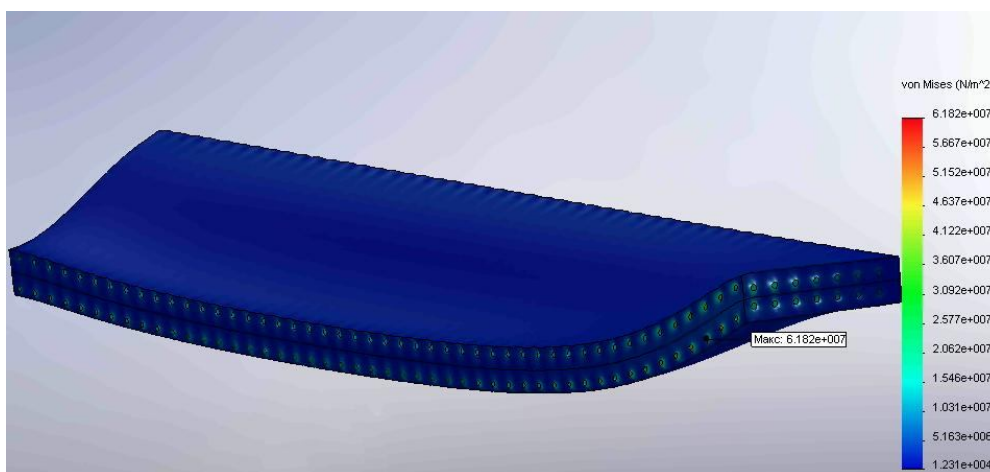


Рис. 8. Распределение приведенных напряжений в железобетонной плите днища понтона



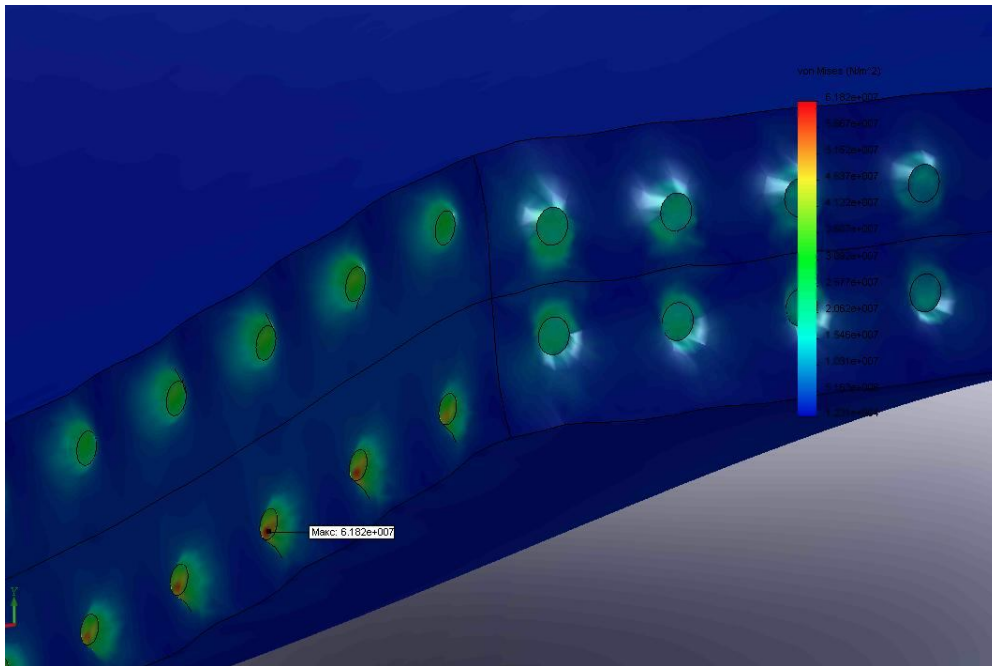


Рис. 9. Фрагмент поля напряжений в опасной зоне плиты дна понтона

Расчеты показали также, что при предельном погружении дока на 17,05 м и пустом отсеке понтона максимальные приведенные напряжения по Мизесу оказались равными:

в плите стапель-палубы ~ 41 МПа;  
в плите дна ~ 62 МПа.

Отношение предела текучести применяемой стальной арматуры класса А-III к максимальным приведенным напряжениям для плит стапель-палубы и дна составляет ~9,5 и ~6,4 соответственно. Такие высокие запасы в случае применения бетона класса В-50 практически обеспечивают прочность стапель-палубы для наиболее экстремального случая нагружения железобетонных плит понтона [2].

В случае применения низших классов бетона следует несколько увеличить диаметр арматуры. Вместе с тем можно обоснованно утверждать, что при применении бетона класса В-50 и диаметрах арматуры 30 и 32 мм получается значительный избыток прочности.

## ВЫВОДЫ

1. Для исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных плит понтона композитного дока успешно применен программный комплекс COSMOSWorks, ориентированный на выполнение расчетного анализа конструктивно однородных тел.

2. Использованная при расчетах прочности плит стапель-палубы и дна уточненная, по сравнению с применяемыми ранее, схема, учитывающая работу арматуры обоих направлений, позволила оптимизировать толщину железобетонных конструкций понтона дока.

3. Полученные результаты расчетов напряженного состояния в плитах железобетонного понтона дока подъемной силой 25000 т дают основание утверждать, что примененная арматура диаметром 30 и 32 мм с бетоном класса В-50 обеспечивает запас прочности, значительно превышающий нормативный. Поэтому целесообразно уменьшить диаметры арматуры, что обеспечит снижение металлоемкости железобетонных конструкций понтона и, соответственно, себестоимость дока.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Зенкевич, О. А.** Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред [Текст] / О. А. Зенкевич, И. Чанг. – М. : Недра, 1974. – 240 с.
- [2] **Коростылев, Л. И.** Расчет прочности железобетонных конструкций понтона композитного плавучего дока методом конечных элементов [Текст] / Л. И. Коростылев, С. Ю. Клименков, Н. Г. Слуцкий // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 5. – С. 19–25.
- [3] Конструкция и прочность железобетонных судов [Текст] / Г. М. Синцов [и др.]. – Л. : Судостроение, 1969. – 215 с.
- [4] Метод конечных элементов [Текст] / под ред. П. М. Варвака. – К. : Вища школа, 1981. – 176 с.

- [5] **Постнов, В. А.** Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций [Текст] / А. В. Постнов, И. Я. Хархурим. – Л. : Судостроение, 1974. – 334 с.
- [6] Правила постройки корпусов судов и плавучих сооружений с применением железобетона [Текст]. – К. : Регістр судноплавства України, 2007. – 120 с.
- [7] Правила класифікації та побудови морських суден [Текст]. – К. : Регістр судноплавства України, 2002. – Т. 1. – 362 с.
- [8] Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков [Текст] : монография / А. С. Рашковский, Н. Г. Слуцкий, В. Н. Коннов, А. В. Щедролов, А. Н. Узлов ; под науч. ред. А. С. Рашковского. – Николаев : РАЛ-полиграфия, 2008. – 614 с.
- [9] **Слуцкий, Н. Г.** Оптимизация железобетонных конструкций понтона композитного плавучего дока [Текст] / Н. Г. Слуцкий // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 4. – С. 78–83.

---

© О. С. Рашковский, Л. І. Коростильов, Д. В. Єрмаков  
Надійшла до редколегії 24.07.2014  
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *Ю. М. Коробанов*