

Спуск на воду – это не только «самое короткое путешествие судна», как его иногда называют, не только цветы, красное вино, замененное позднее на шампанское, как неотъемлемая часть ритуала «крещения» судна, но и особо ответственная операция, которой во все времена уделялось особое внимание.

Значимость церемонии спуска судна на воду объяснялась не только тем, что это была одна из стадий его создания, но и тем, что силы, действующие на его корпус при традиционном спуске с наклонного стапеля, могут быть не меньше, чем во время плавания, а скорость скольжения судна по спусковым полозьям иногда превышает скорость при эксплуатации [1].

Поиски путей снижения затрат и сокращения сроков постройки судов привели к тому, что в последнее время предпочтение отдается горизонтальному, а не наклонному положению судна в процессе его постройки. Поэтому для строительства судов преимущественно стали использовать сухие доки и горизонтальные стапели [2].

Если способ спуска на воду судов, построенных в сухих доках, определен конструкцией этих сооружений, то для спуска судов с горизонтальных стапелей или подъема на них судов применяются различные спускоподъемные сооружения, различающиеся по принципам работы и конструкции, в том числе слипы, подъемники, краны и другие грузоподъемные средства, а также плавучие доки.

Для подъема с воды крупных судов или спуска их на воду наиболее предпочтительными являются и преимущественно используются сухие и плавучие доки [3]. При этом строительство судна на горизонтальном стапеле имеет преимущество по сравнению со строительством в сухом доке, поскольку горизонтальные стапели находятся на одном уровне с основными цехами верфи, что делает доступ к ним более удобным.

Плавучие доки для спуска судов с берегового стапеля на воду стали использоваться после изобретения в первой половине XIX в. Жильбером балансирующего плавучего дока [4]. Такой тип плавучего спускоподъемного устройства, соответствующий U-образному плавучему доку со стапель-палубой выше ватерлинии, наиболее подходил для проведения операций по спуску судов на воду.

Первое, насколько известно, использование плавучего дока для спуска судов на воду произошло в середине XIX в. в США на военно-морской верфи «Киттери» в Пенсаколе (рис. 1).

Для спуска судна этот плавучий док размещался в бассейне на деревянных клетках, установленных на сваях, называемых сейчас «жестким основанием». Для перемещения судна

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАВУЧИХ ДОКОВ ДЛЯ СПУСКА СУДОВ НА ВОДУ И ПОДЪЕМА С ВОДЫ НА БЕРЕГ

*А.Г. Смирнов, д-р техн. наук, зам. главного конструктора направления, АО «ЦМКБ «Алмаз»,  
контакт. тел. (812) 373 0292*

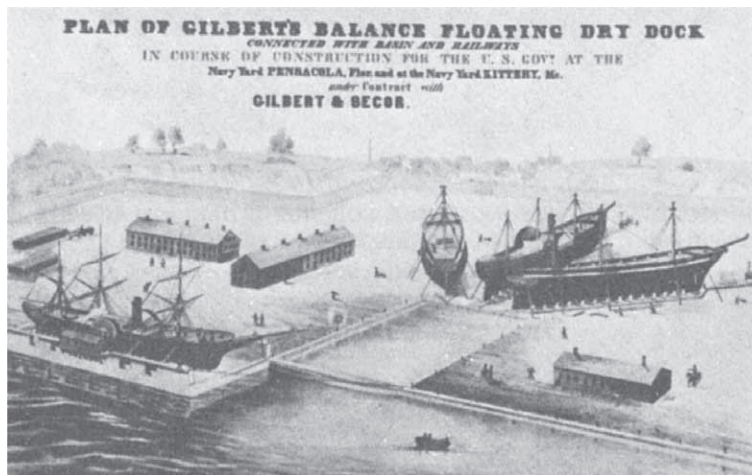


Рис. 1. Верфь «Киттери» с балансирующим плавучим доком

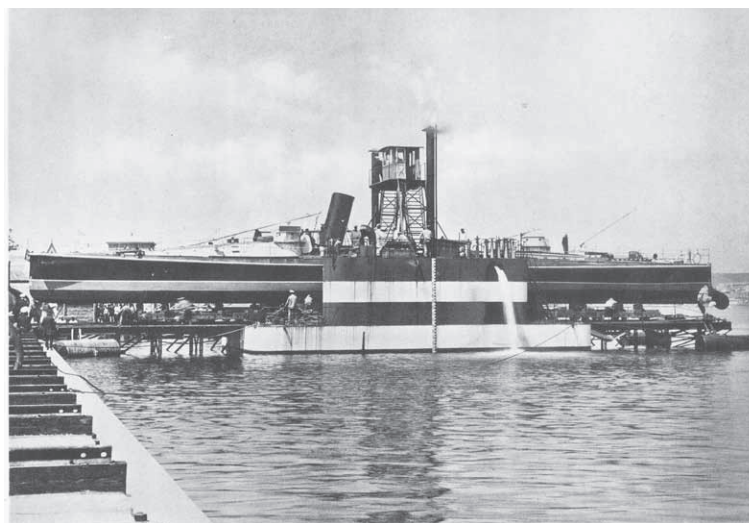


Рис. 2. Док-мост у берегового стапеля

со стапеля на плавучий док использовались береговые лебедки. Имелась также возможность не только продольного перемещения судна, но и поворота его перед затягиванием на док из углового положения по отношению к его продольной оси.

Для первых операций по спуску или подъему судов, которые, как правило, носили разовый характер, «метод плавучего дока», как его тогда называли, применялся в качестве вынужденной меры. Поэтому использовались существующие плавучие доки. При этом каких-либо особых трудностей или опасностей в тех немногих случаях, когда

для спуска судов на воду или их подъема с воды применяли плавучие доки, не было зарегистрировано, несмотря на то, что оборудование, которое при этом использовалось, было в рудиментарном состоянии [2].

Это объясняется, по всей видимости, тем, что такие операции проводились не только в благоприятных условиях, но и в районах, где амплитуда прилива и отлива сравнительно невелика, и с судами, которые имели небольшое водоизмещение по сравнению с грузоподъемностью используемого плавучего дока, к тому же устанавливаемого на «жесткое основание».

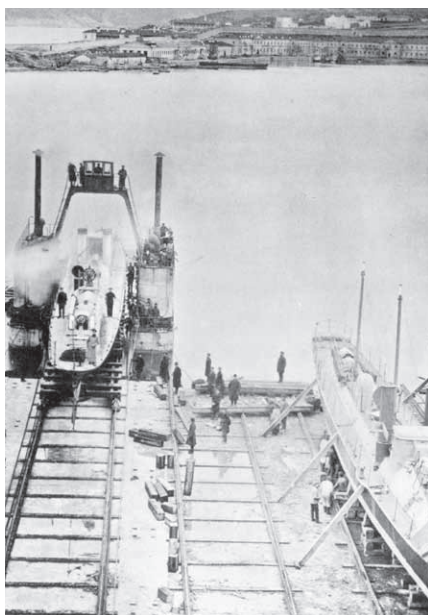


Рис. 3. Перекатка миноносца на береговой стапель

хранение горизонтального положения плавучего дока на уровне берегового стапеля при воздействии прилива и отлива в период перемещения судна по доку. При этом допустимые нагрузки на корпус судна и плавучего дока, а также на «жесткое основание» обеспечивались за счет откачки балласта из отсеков дока.

В нашей стране первый плавучий док такого назначения был построен в 1890 г. в Севастополе. Это металлическое U-образное плавучее судоподъемное сооружение, получившее название док-мост, было предназначено для подъема из воды миноносцев и выкатки их на тележках по рельсовым путям на береговой стапель (рис. 2 и рис. 3), а также спуска их на воду после ремонта [5].

Однако для реализации такого способа постановки плавучего дока у береговых горизонтальных стапелей необходимо строительство подводных опор

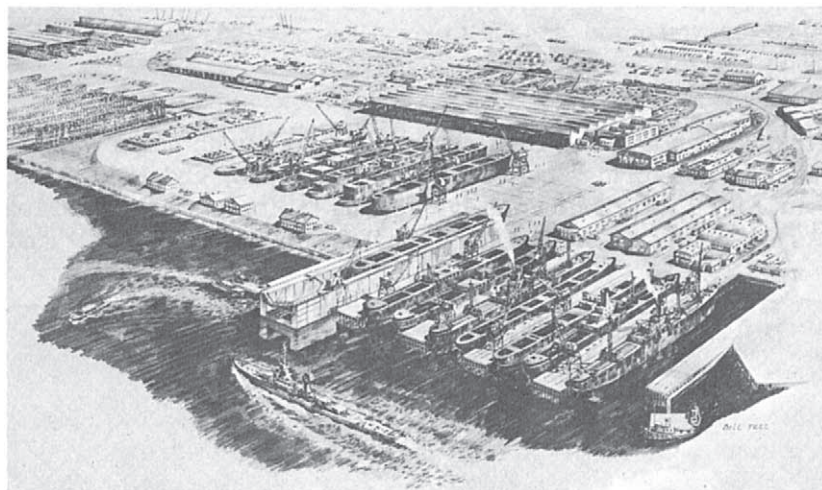


Рис. 4. План верфи компании «Терминал Айлэнд»



Рис. 5. Плавучий док «Сухона» на береговых опорах

Таким образом, создавались необходимые условия для обеспечения безопасного проведения спусковой операции, основным условием которой было со-

в виде «жесткого основания», имеющих значительную стоимость, а также усложняющих плавание судов в этом районе.

Чтобы частично устранить указанные недостатки, особенно касающиеся усложнения судоходства на акватории верфи, в ряде случаев подводные опоры выполняются в выемке набережной или конструктивно совмещаются с другими гидротехническими сооружениями [2]. Примером реализации такого способа является размещение плавучего дока в США на калифорнийской верфи компании «Терминал Айлэнд» (рис. 4).

В нашей стране большого распространения способ постановки плавучих доков на «жесткое основание» не нашел. Только два построенных в 80-е гг. XX в. плавучих дока «Торос» и «Паллада», имеющих композитный корпус, состоящий из металлических башен и железобетонного понтона, по условию обеспечения прочности пришлось устанавливать на «жесткое основание», состоящее из группы подводных опор. Этими плавучими доками были оснащены судоремонтный завод «Нерпа» и дальневосточный завод «Звезда».

Несмотря на то, что в отечественной практике кроме постановки на «жесткое основание» имеется опыт установки передаточных плавучих доков на период выполнения спусковой операции на одну, две или три опоры, наибольшее распространение получил двухопорный вариант. Установка металлического передаточного плавучего дока на две опоры (береговую и мористую) с обеспечением продольной накатки судна на плавучий док по рельсовым путям с помощью судовозных тележек за границей получила название «русского метода».

В качестве одного из наиболее удачных в отечественной практике можно считать вариант применения «русского метода» при установке в порту Императора Александра III плавучего док-моста грузоподъемностью 400 т, построенного Санкт-Петербургским Металлическим заводом в 1906 г. для обслуживания 20 стапельных мест. Это металлическое судоподъемное сооружение, имеющее традиционную для плавучих доков U-образную форму, было оснащено рельсовыми путями и судовозными тележками, на которых размещались кильблоки. После докования судна, выполняемого в гавани, док-мост заводился в бассейн лагом, где садился своими оконечностями на уступы противоположных стенок бассейна таким образом, чтобы его рельсовые пути совмещались с береговыми путями. С помощью судовозных тележек судно выкатывалась на один из береговых стапелей для ремонта [5].

Немногим более 70 лет спустя аналогичный вариант размещения металлического передаточного плавучего дока «Сухона» грузоподъемностью 25000 т был применен в Северодвинске при со-

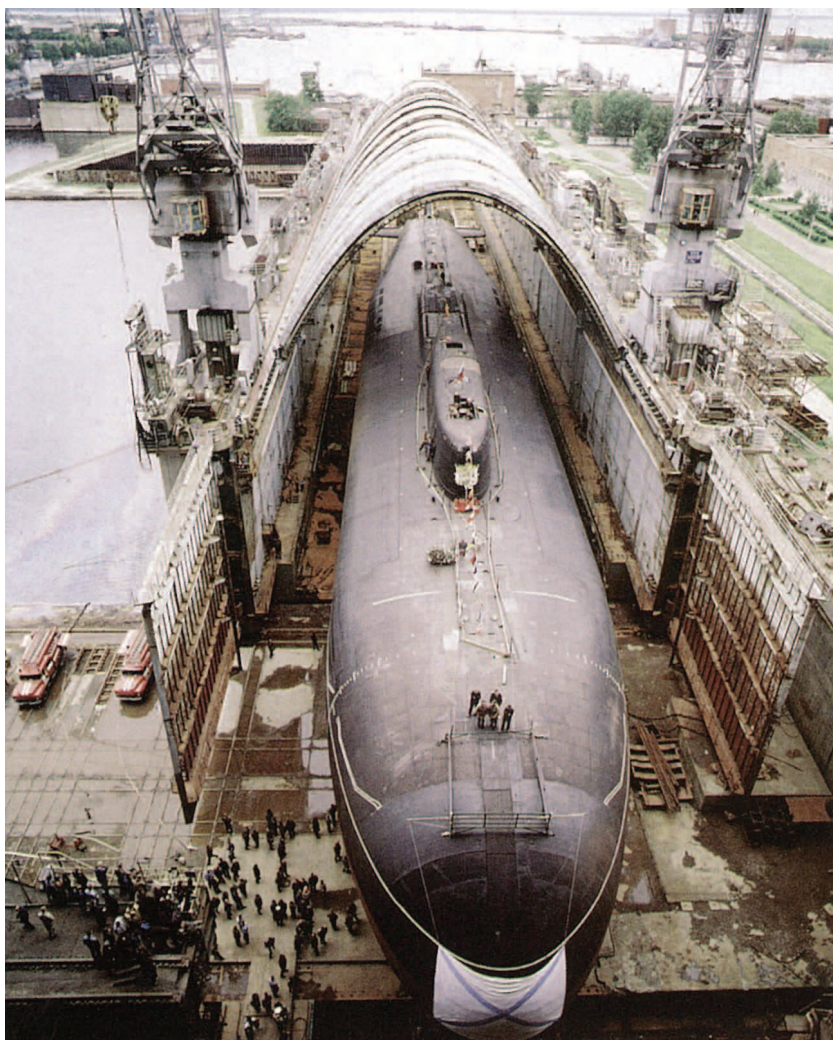


Рис. 6. Накатка АПЛ на плавучий док «Сухона»

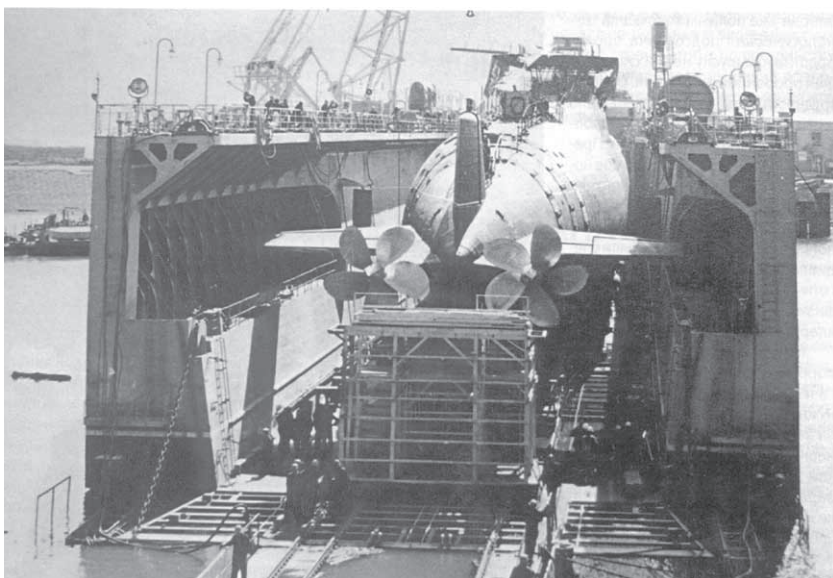


Рис. 7. Плавучий док «Амур» после накатки на него АПЛ

здании нового судостроительного комплекса (рис. 5).

С использованием этого плавучего дока обеспечивался спуск на воду атомных подводных лодок (АПЛ), в том числе и крупнейших в мире, а при необходимости и их подъем с воды на береговые стапельные места (рис. 6).

В процессе реконструкции и расширения производственных возможностей крупнейших судостроительных предприятий России передаточными плавучими доками были также оснащены в 1969 г. «Амурский судостроительный завод» (рис. 7), в 1972 г. «Прибалтийский судостроительный

завод «Янтарь» (рис. 8), в 1974 г. «Адмиралтейские верфи» (рис. 9), в 1975 г. «Судостроительный завод «Северная верфь» (рис. 10).

На этих плавучих доках, так же как на плавучем доке «Сухона», реализована продольная система накатки спускаемых судов по рельсовым путям, а плавучие доки установлены на две опоры, береговую и мористую.

Конструктивно береговые и мористые опоры могут существенно отличаться и быть стационарными или съемными, а также надводными или подводными.

Наиболее характерным примером установки дока на береговую и стационарную подводную мористую опору является размещение плавучего дока «Балтика» грузоподъемностью 12500 т на «Прибалтийском судостроительном заводе «Янтарь» в Калининграде (см. рис. 8) [6]. Однако наличие стационарной мористой опоры в виде подводных клеток существенно стесняет акваторию предприятия и усложняет проход судов в этом районе.

Со съемной мористой опорой, в качестве которой используется откидной плавучий кринолин, эксплуатируется плавучий док «Кораблестроитель Дмитрий Афанасьев» грузоподъемностью 13000 т на «Судостроительном заводе «Северная верфь» в Санкт-Петербурге. Такой вариант установки плавучего дока является попыткой устранить основной недостаток предыдущего способа и создать для судоходства на акватории предприятия более благоприятные условия (рис. 11).

На «Севмашпредприятии» более двух десятилетий эксплуатировался имеющий только береговую опору транспортно-передаточный плавучий док «Онега» грузоподъемностью 1600 т, предназначенный для приема с горизонтального стапеля, транспортировки и передачи на горизонтальный стапель крупногабаритных тяжеловесных блоков строящихся судов. Преимущества одноопорного варианта стыковки плавучего дока с береговыми сооружениями очевидны, так же как простота средств контроля его посадки и прочности корпуса во время выполнения операции по перемещению блоков в условиях интенсивных приливов и отливов, которые присущи этому региону.

Передаточный плавучий док «Балтика» на судостроительном заводе «Янтарь» помимо варианта установки на две опоры используется и с установкой только на береговую опору, но при существенном ограничении его грузоподъемности по сравнению с двухопорным вариантом.

В зарубежной практике иногда используется поперечная система пере-



Рис. 8. Накатка парома «Сахалин» на плавучий док «Балтика»



Рис. 9. Плавучий док «Луга»



Рис. 10. Плавучий док «Кораблестроитель Дмитрий Афанасьев»

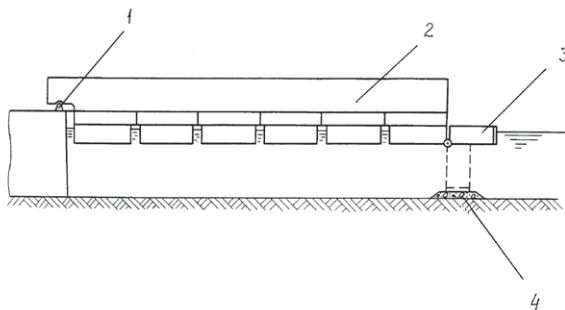


Рис. 11. Схема постановки плавучего дока «Кораблестроитель Дмитрий Афанасьев» на стационарную береговую и съёмную подводную опоры  
1 – береговая опора; 2 – плавучий док; 3 – кранополк-опора; 4 – опорная площадка

мещения судов с берегового стапеля на передаточный плавучий док или с дока на береговые стапельные места [7]. Такой способ перемещения крупных кораблей при их накатке на плавучий док использовался в США полвека назад на верфи «Инголлс шипбилдинг» (рис. 12).

Постановка плавучего дока около берегового стапеля осуществлялась на «жесткое основание», а для поперечного перемещения судна одна из двух его башен демонтировалась на период выполнения этой операции и вновь устанавливалась после ее завершения (рис. 13). При этом для перемещения судна использовалось судовозное оборудование на пневматическом ходу.

Следует отметить, что способ поперечной передачи судна с воды на берег или с берега на воду с использованием однобашенного плавучего дока – это не новое техническое решение, он был разработан в Англии еще во второй половине XIX в. и реализован на нескольких верфях в Европе. Для такой операции использовался однобашенный плавучий док с разрезным гребенчатым понтоном и понтоном-противовесом [5].

В конце 80-х гг. XX в. Феодосийской судостроительной корпорацией «Море» для обеспечения спуска на воду судов на подводных крыльях и подъема их на берег было построено и использовалось L-образное плавучее спуско-подъемное сооружение, названное плавучей спусковой платформой, ввод и вывод судов из которого выполнялся лагом [8].

Развитие блочных и блочно-модульных принципов в судостроении привело к использованию плавучих доков для обеспечения формирования корпусов судов при их «бесстапельной» постройке. Одними из первых формировать корпус судна в плавучем доке из стандартных модулей стали на американской верфи компании «Эри марин», специализировавшейся на строительстве крупнотоннажных рудовозов для Великих Озер [9].

В отечественной практике в настоящее время в качестве плавучего стапеля Выборгским судостроительным заводом используется плавучее четырехбашенное сооружение, названное самоподъемной баржей «Атлант» (рис. 14).

На этой барже формируют корпуса судов из блоков массой 200–300 т, которые накатывают на нее с помощью тележек на пневматическом ходу. При этом в процессе накатки блоков баржа поддерживается на уровне передаточного причала без использования опор. На период перемещения по барже блоков три из четырех ее башен демонтируют, а после завершения этой опера-

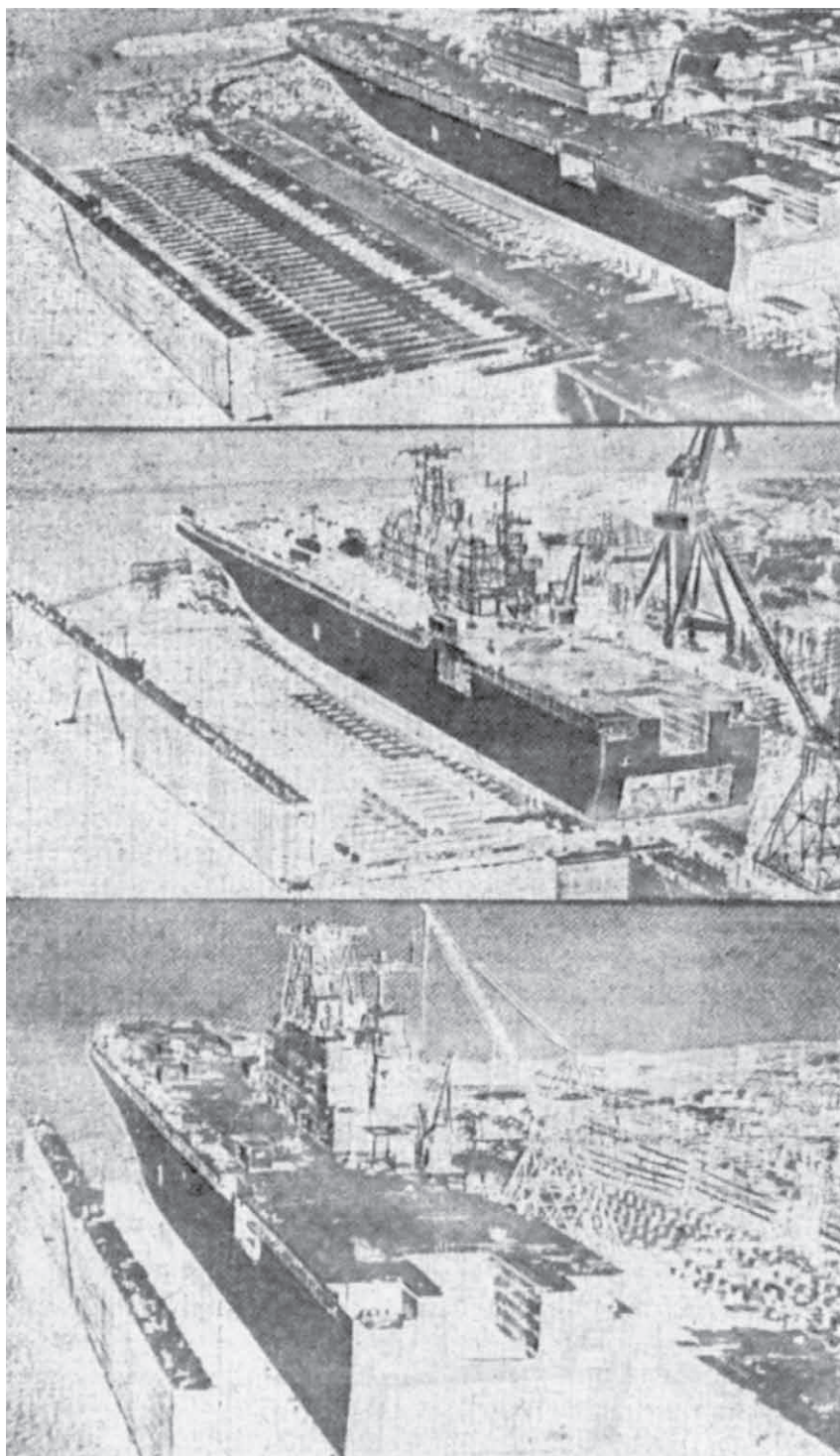


Рис. 12. Три этапа накатки корабля на плавучий док на верфи «Инголлс шипбилдинг»



Рис. 14. Плавучая самоподъемная баржа «Атлант»

ции восстанавливают. Спуск судна на воду осуществляется традиционным методом докования [10].

На ряде верфей Южной Кореи, Японии и Китая в плавучих доках ведется сборка судов из крупных бло-

ков. Блоки могут доставляться на плавучий док с помощью кранов грузоподъемностью до 2000–3000 т, на колесных транспортерах с берега или баржи-площадки. На некоторых верфях плавучими доками осуществляется спуск на воду полностью сформированных крупнотоннажных судов, перемещаемых на плавучий док с помощью колесных транспортеров. При этом такие спусковые операции выполняются без использования береговых или подводных опор. Удержание дока на уровне причала в период накатки судна и обеспечение плавного перехода судна с причальной стенки на док обеспечивается балластировкой [11].

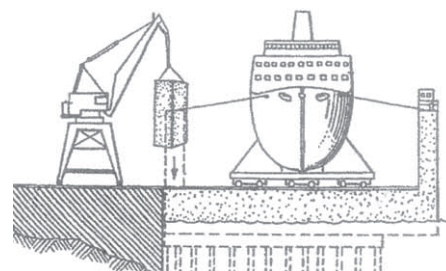


Рис. 13. Схема постановки плавучего дока на «жесткое основание» на верфи «Инголлс шипбилдинг»

В настоящее время на ряде судостроительных и судоремонтных предприятий нашей страны, оснащенных в 70-х–80-х гг. прошлого века передаточными плавучими доками, идет подготовка к реконструкции с целью совершенствования методов и средств, обеспечивающих строительство судов, в том числе оснащения их новыми спускоподъемными сооружениями, поскольку приближается окончание срока службы существующих.

Во второй половине XX в. в нашей стране предпочитали применять «русский метод», что и было реализовано в процессе оснащения предприятий судостроительной промышленности передаточными плавучими доками, обеспечивающими его реализацию.

За прошедшие полвека появились и были успешно апробированы новые технологии выполнения спуско-подъемных операций, а также разработан ряд новых архитектурно-конструктивных компоновок плавучих доков, использовавшихся для их реализации. Поэтому, по всей видимости, потребуется углубленное рассмотрение вопроса взаимодействия передаточных плавучих доков с береговыми и гидротехническими сооружениями с учетом произошедших изменений и требований к ним.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Surveyor, 1974, vol. 8, p. 22-30.
2. Waterways & Harbors Division, 1970, vol. 96, № 1, p.121-144.
3. International Shipbuilding Progress, 1964, №116 (April), p. 179-189.
4. Брокгауз Ф.А., Эфрон И.А. Энциклопедический словарь. – СПб., 1893, т. X.
5. Киприянович В. Сухие и плавающие доки. – СПб., 1911.

6. Пегов Н.П., Петраков Л.А., Чесноков В. Н. Первый отечественный спусковой и ремонтный док грузоподъемностью 12 500 т // Судостроение. – 1973. – № 6.
7. Marine Technology. 1976, vol. 13, № 2, p. 184–191.
8. Лапочкин Э.В., Поляков А.П., Петраков Л.А., Смирнов А.Г. Спуск и подъем судов с динамическими принципами поддержания с использованием плавучей спусковой

- платформы // Технология судостроения. – 1988. – №9.
9. Сырков А.К. Современные судостроительные верфи. – Л.: Судостроение, 1976.
  10. Ледокол строится на «Атланте» // Судостроение. – 2013. – № 4. – С. 72-73.
  11. Мореходов М.А. Современная сборка судов – новые технологии // Судостроение. – 2009. – № 2. ■

Данная работа – это продолжение исследования несущей способности иллюминаторов высокого давления со светопрозрачным элементом в форме диска с использованием обжимной шайбы [3]. Схема такого иллюминатора показана на рис. 1.

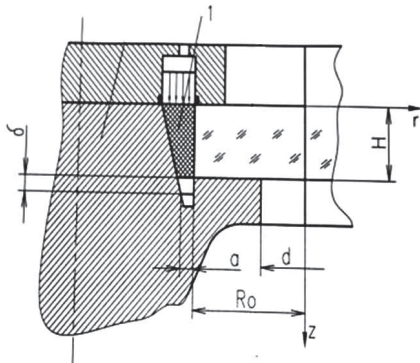


Рис. 1. Схема иллюминатора

В работе [1] отмечена необходимость точного определения податливости обоймы иллюминатора для увеличения его несущей способности. Вторым важным условием, определяющим ресурс и надежность, является передача на боковую поверхность стеклоэлемента радиальных сжимающих усилий. Для создания радиального сжатия и обеспечения герметичности используется шайба 1 из материала, модуль упругости которого приблизительно на порядок меньше, чем у стекла. При воздействии гидростатического давления и реакции со стороны корпуса и стеклоэлемента материал шайбы сжимается и она проскальзывает на величину  $\delta$  в коническую полость, образованную между светопрозрачным элементом и обоймой. В результате этого на боковую поверхность стеклоэлемента действуют сжимающие усилия, превышающие приложенное гидростатическое давление и увеличивающиеся от поверхности приложения гидростатического давления к контактной поверхности. Величина и характер их распределения определяются геометрическими и физическими параметрами обжимной шайбы и технологическими параметрами сборки. В совокупности эти параметры определяют и величину ее осевого смещения, ограничение которой приводят как к изменению ха-

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЖИМНОЙ ШАЙБЫ ИЛЛЮМИНАТОРОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

**Н.М. Вихров**, д-р техн. наук, проф.,  
ген. директор ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»,  
**В.П. Лянзберг**, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, начальник науч. группы МАИ (Национального исследовательского университета),  
контакт. тел. +7 (915) 222 2977

рактера передаваемых усилий, так и к нарушению герметичности. В данной работе приведена методика оценки величины осевого смещения шайбы без учета нелинейного характера поведения материала и сил трения. Поэтому данное решение соответствует осевому смещению в первоначальный момент достижения рабочего давления.

**Постановка задачи.** Параметры обжимной шайбы найдем из условия равенства работы  $A$ , совершаемой при ее осевом смещении на величину  $\delta$  под воздействием гидростатического давления  $q$  и накопленной при этом потенциальной энергии  $U$ . Ее модуль упругости  $E$  значительно меньше материала обоймы и стеклоэлемента, поэтому их податливость можно не учитывать. В качестве исходных геометрических параметров примем  $\alpha$  – угол конусности внешней боковой поверхности обжимной шайбы;  $H, a, R_0$  – соответственно высота, минимальный размер, радиус внутренней поверхности;  $\Delta$  – величина натяга.

Рассмотрим трехмерную осесимметричную задачу линейной теории упругости. Точка на боковой конической поверхности имеет координаты  $(r(z), z)$ , где

$$r(z) = R_0 + a + H \times \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - z \times \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (1)$$

Уравнение равновесия для трехмерной осесимметричной задачи имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Примем следующее распределение  $\sigma(z)$ :

$$\sigma_z = -q \times \left(1 - \frac{z}{H}\right). \quad (3)$$

Так как шайба проскальзывает в коническую полость между стеклоэлементом и обоймой, то при  $r = R_0$

$$\tau_{rz} = 0. \quad (4)$$

С учетом (3) второе уравнение системы (2) можно записать так:

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = -\frac{q}{H}. \quad (5)$$

Уравнение (5) является уравнением вида  $F(x, y, z, \frac{\partial F}{\partial z}) = 0$  ([2] с.332).

Общий вид решения такого уравнения:

$$\tau_{rz} = \frac{\Psi(z)}{2} - \frac{q}{H} \times \frac{r}{2}.$$

Из уравнения (4) следует

$$\Psi(z) = \frac{q \times R_0^2}{2 \times H}; \quad \frac{\partial \Psi(z)}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

Уравнения для напряжений запишем в виде

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -q \times \left(1 - \frac{z}{H}\right); \\ \sigma_r &= E \times \varepsilon_r + \nu \times (\sigma_\theta + \sigma_z); \\ \sigma_\theta &= E \times \varepsilon_\theta + \nu \times (\sigma_r + \sigma_z). \end{aligned} \quad (7)$$

Выразим деформации  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$  и напряжения  $\sigma_\theta$  через перемещения:

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \nu^2} \times \left( \frac{\partial u_r}{\partial r} + \nu \times \frac{u_r}{r} \right) + \frac{\nu}{1 - \nu} \times \sigma_z. \quad (8)$$

Первое уравнение системы (2) с учетом (8) можно записать в виде

$$r^2 \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + r \times \frac{\partial u_r}{\partial r} - u_r = 0. \quad (9)$$

Это уравнение Эйлера вида [2]

$$x^2 \times \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + x \times \frac{\partial y}{\partial x} + ay = 0, \quad (10)$$

где  $a = -\nu^2 < 0$  и имеет решение

$$u_r = C_1(z) \times r + C_2(z) \times \frac{1}{r}. \quad (11)$$

Граничные условия имеют вид

$$u_r(R_0) = \Delta;$$

$$u_r(R_0 + a + (H - z) \times \operatorname{tg}(\alpha/2)) = (12)$$

$$= -\delta \times \operatorname{tg}(\alpha/2).$$

Подставим (11) в (12) и решим полученную систему уравнений относительно  $C_1(z), C_2(z)$ . Получим решение, связывающее геометрические и технологические параметры:

$$C_1(z) = \frac{\Delta}{R_0} -$$

$$\frac{r(z) \times [\delta \times \operatorname{tg}(\alpha/2) + \Delta \times \frac{r(z)}{R_0}]}{r^2(z) - R_0^2}; \quad (13)$$

$$C_2(z) = \frac{R_0^2 \times r(z) \times (\delta \times \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \Delta \times \frac{r(z)}{R_0})}{r^2(z) - R_0^2}. \quad (14)$$

На основании полученных значений (13) и (14) из уравнений (7), (8), (11) можно получить соотношения для перемещений, деформаций и напряжений. Накопленная потенциальная энергия  $U$  в результате осевого проскальзывания обжимной шайбы на величину  $\delta$  определим из уравнения

$$U = 0,5 \times \int_V (\varepsilon_r \times \sigma_r + \varepsilon_\theta \times \sigma_\theta + \varepsilon_z \times \sigma_z) \delta V.$$

Полученное таким образом соотношение можно привести к сумме табличных интегралов вида

$$\int \frac{\partial x}{x} = \frac{1}{\sqrt{-\Omega}} \times \ln \frac{2 \times b \times x + c - \sqrt{-\Omega}}{2 \times b \times x + c + \sqrt{-\Omega}};$$

$$\int \frac{x \partial x}{X} = \frac{\ln X}{2 \times b} - \frac{c}{2 \times b} \int \frac{\partial x}{X},$$

где  $X = b \times x^2 + c \times x + d$ ;  $\Omega = 2 \times b \times d - c^2$ .

Здесь  $b, c, d, \Omega$  – функции геометрических параметров обжимной шайбы:

$$b = \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}; \quad c = 2 \times (R_0 + b) \times \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2};$$

$$d = 2 \times R_0 \times b + b^2.$$

Работа  $A$ , совершаемая в результате воздействия на большую торцевую поверхность обжимной шайбы гидростатическим давлением  $q$  и ее проскальзывания на величину  $\delta$  между стеклоэлементом и обоймой, определим из уравнения

$$A = 0,5 \times F \times \delta = 0,5 \times \delta \times q \times \pi \times$$

$$\times \{(R_0 + a + H \times \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2})^2 - R_0^2\}.$$

В результате преобразования уравнения  $A = U$  получим итоговое соотношение, связывающее геометрические, технологические параметры и приложенное гидростатическое давление

$$A \times \Delta^2 + B \times \Delta \times \delta + C \times \delta^2 = D \times \delta.$$

Величины  $A, B, C, D$  – это функции указанных выше параметров. Задавая одну из величин  $\delta$  или  $\Delta$ , получаем квадратное уравнение относительно другой. Физический смысл имеет одно из решений. Данный алгоритм реализован в среде Matcad.

Из анализа полученного решения можно сделать следующие выводы: на боковую поверхность стеклоэлемента передаются сжимающие усилия, увеличивающиеся по мере приближения к опорной контактной поверхности, и по величине большие приложенного гидростатического давления. Соотношение между максимальными сжимающими напряжениями ( $z = H$ ) и действующими на боковую поверхность вблизи приложенного гидростатического давления ( $z = 0$ ) для заданного светопрозрачного элемента при фиксированных значениях  $\Delta, H, \alpha$  обжимной шайбы существенно зависит от ее минимальной толщины  $a$ . Так, для иллюминатора со стеклоэлементом диаметром 0,095 м и толщиной 0,025 м и обжимной шайбой из органического стекла при  $\Delta = 0,01$  мм величина  $\beta = 1,408$  при  $a = 0,007$  м; при  $a = 0,003$  м –  $\beta = 2,189$ . Величина осевого смещения в последнем случае составит 0,00178 м при  $P = 20$  МПа. Если в качестве материала использовать полиэтилен низкого давления с модулем упругости  $E = 950$  МПа, то величина осевого смещения при  $a = 0,0005$  м и внутреннем диаметре 0,27 м составит 0,0047 м при рабочем давлении 5 МПа. Величина  $\beta$  при этом равна 3,17. Данные значения близки к экспериментальным в первоначальный момент достижения рабочего давления. В дальнейшем величина осевого смещения  $\delta$  и время восстановления первоначальной формы при прочих равных условиях определяются

параметрами цикла нагружения [5]. Зависимость  $\delta(P)$  осевого смещения  $\delta$  от давления  $P$  линейная. Это было отмечено ранее при исследовании конических акриловых иллюминаторов [4] в интервале рабочих давлений при любом угле конусности. Однако значительное увеличение рабочего давления и надежности изделия можно реализовать только при одновременном точном определении параметров обжимной шайбы, податливости обоймы и соотношении между диаметром стеклоэлемента  $D_1$  и световым диаметром иллюминатора  $d$ . Так для образцов с  $D_1 = 0,120$  м и  $d = 0,060$  м при кратковременном воздействии давление нарушения целостности при прочих равных условиях с жесткой обоймой составляет 20 МПа. Для конструкции с оптимальной податливостью с такими же параметрами шайбы давление нарушения равно 60 МПа. При этом характер разрушения одинаковый [3] и потери герметичности конструкции в воде в обоих случаях в первоначальный момент нарушения целостности не были отмечены. В гелиокислородной среде в данном случае наблюдается потеря герметичности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вихров Н.М., Лянзберг В.П. Некоторые общие подходы к проектированию иллюминаторов высокого давления // Морской вестник. – 2017. – №2(62). – С.31–33.
2. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука. – 1971. – 576 с.
3. Лянзберг В.П., Шалашилин В.И. Иллюминаторы высокого давления со светопрозрачным элементом в форме диска из неорганического стекла // Вестник МАИ. – 2002. – Т.9. – С.51–56.
4. Лянзберг В.П., Шалашилин В.И. Несущая способность конических стеклоэлементов иллюминаторов из акрила с учетом объемной потери устойчивости // Механика твердого тела/РАН. – 2002. – №3. – С.164–179.
5. Лянзберг В.П. Несущая способность иллюминаторов из акрила с плоским основанием при воздействии гидростатического давления // Вестник МАИ. – 2003. – Т.10. – С.71–79. ■