

ВІСНИК

A tall, white, cylindrical lighthouse stands on a rocky island in the middle of the sea. The lighthouse has a dark lantern room at the top and a small square base. The sky is blue with some clouds, and the water is dark blue.

ОДЕСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО
УНІВЕРСИТЕТУ

34

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ



**ВІСНИК
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

Збірник наукових праць

ВИПУСК 34 (1)

Заснований у червні 1997 року

Одеса – 2012

**ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ВІСНИК
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

№ 34 (1)
2012

Заснований у червні 1997 року.

Виходить 4 рази на рік

Свідоцтво Міністерства юстиції України
про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 17536-6286 Р від 11.02.2011 р.

УДК 629.12.002(082)

Збірник включено до переліку № 1 наукових фахових
видань України, в яких можуть публікуватися результати
дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів
доктора і кандидата наук
(Постанова ВАК № 1-05/1 від 26.01.11)

Засновник і видавець:
ВНЗ «Одеський національний морський університет»
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34

Редакційна колегія:

д-р економ. наук, проф. **І.В. Морозова** – відп. редактор
канд. техн. наук, доц. **С.М. Баскаков** – заст. відп. редактора
Г.І. Силакова – відповід. секретар

д-р техн. наук, проф.	Вассерман О.А. ,	д-р физ.-мат. наук, проф.	Андронов І.Л. ,
д-р техн. наук, проф.	Гришин В.О. ,	д-р техн. наук, проф.	Дубровський М.П. ,
д-р техн. наук, проф.	Єгоров Г.В. ,	д-р техн. наук, проф.	Івановський В.Г. ,
д-р техн. наук, проф.	Євдокімов В.Д. ,	д-р техн. наук, проф.	Козляков В.В. ,
д-р техн. наук, проф.	Клованич С.Ф. ,	д-р екон. наук, проф.	Лапкіна І.О. ,
д-р техн. наук, проф.	Козирев В.К. ,	д-р техн. наук, проф.	Сизов В.Г. ,
д-р екон. наук, проф.	Махуренко Г.С. ,	д-р техн. наук, проф.	Яровенко В.О. ,
д-р екон. наук, проф.	Постан М.Я.		

Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеського національного морського університету
(протокол № 7 від 29 лютого 2012 р.)

**Відповідальність за достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв, назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей.
Висловлені у цих статтях думки можуть не збігатися з точкою зору редакційної колегії, не покладають на неї ніяких зобов'язань.**

Передруки і переклади дозволяються лише за згодою автора та редакції.



УДК 629.12.073.243.4:532.59(043.3)

Баскаков С.Н., Егоров Г.В., Морозова И.В.

ВКЛАД Ю.Л. ВОРОБЬЕВА В КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНУЮ НАУКУ

Рассмотрены основные результаты научной и инженерной деятельности Ю.Л. Воробьева и созданной им научной школы.

Ключевые слова: асимптотическая теория качки, гидродинамическая теория качки, краевая задача, потенциал возмущенных скоростей жидкости, сращивание решений, линеаризация нелинейной краевой задачи, математическая модель, тонкое судно, удлиненное судно, присоединенные массы, коэффициенты демпфирования, возмущающие силы.

Розглянуто основні результати наукової та інженерної діяльності Ю.Л. Воробйова та створеної ним наукової школи.

Ключові слова: асимптотична теорія хитавиці, гідродинамічна теорія хитавиці, краєва задача, потенціал обурених швидкостей рідини, зрощування рішень, лінеаризація нелінійної краєвої задачі, математична модель, тонке судно, подовжене судно, приєднані маси, коефіцієнти демпфування, сили, що обурюють.

The basic results of scientific and engineering activity of J.L.Vorobyov and the scientific school created by it are considered.

Keywords: the asymptotic theory of rolling, the hydrodynamic theory of rolling, a regional problem, potential of the indignant speeds of a liquid, merging of decisions, linearisation a nonlinear regional problem, mathematical model, the thin vessel, the extended vessel, added mass, damping, existing forces.

Целью работы является обобщение научной деятельности Ю.Л.Воробьева и его места в кораблестроительной науке.

Изложение основного материала. Рассмотрим прямолинейное движение судна на взволнованной поверхности моря. Характеристики формы и нагрузки судна считаются известными, а корпус предполагается недеформируемым твердым телом. Многочисленными исследованиями [1, 2, 3] установлено, что при определении характеристик морского волнения и поверхностных волн, вызванных движением тел у свободной поверхности, жидкость можно считать идеальной, а ее возмущенное движение потенциальным. Это допущение является основным в гидродинамической теории качки и позволяет сформулировать целый ряд краевых задач, для решения которых применяются аналитические и численные методы. Движения системы судно – жидкость описывается в трех декартовых прямоугольных системах координат:

- неподвижной в пространстве системе x_0, y_0, z_0 ;
- перемещающейся вместе с судном системе x', y', z' ;
- жестко связанной с судном системе x, y, z .

Плоскости $x_0 y_0$ и $x' y'$ совпадают с невозмущенной свободной поверхностью воды $z_0 = z' = 0$, оси z_0 и z' направлены вертикально вниз, оси x_0 и x' совпадают с направлением средней скорости \bar{v} судна. Связь неподвижной и подвижной систем описывается соотношением

$$x' = x_0 - vt, \quad y' = y_0, \quad z' = z_0. \quad (1)$$

В равновесном положении перемещающаяся и жестко связанная с судном системы совпадают, а связь между ними в произвольный момент времени описывается с помощью корабельных эйлеровых углов [4]. В неподвижной системе наиболее просто формулируются условия на свободной поверхности жидкости, в жестко связанной с судном системе - граничные условия на корпусе. Колебания судна и жидкости относительно поступательного перемещения естественно исследовать в подвижной системе. На регулярном волнении колебания судна относительно этой системы являются периодическими. Область E^0 , занятая жидкостью, ограничена смоченной поверхностью S^0 судна, свободной поверхностью Σ^0 , уравнение которой $z_0 = \zeta(x_0, y_0, t)$ заранее неизвестно, и в случае мелководья - дном $z_0 = H$

Для потенциала $\Phi^0(x_0, y_0, z_0, t)$ скоростей жидкости, возмущенных движущимся на волнении судном, имеет место следующая краевая задача

$$\Delta \Phi^0 = 0, \quad (x_0, y_0, z_0) \in E^0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi^0}{\partial t^2} + 2\bar{v}\Phi^0 \frac{\partial \Phi^0}{\partial t} + \frac{1}{2}\bar{v}\Phi^0 \cdot \bar{v}(\bar{v}\Phi^0)^2 - g \frac{\partial \Phi^0}{\partial z_0} = 0, \quad (x_0, y_0) \in \Sigma^0, \quad (3)$$

$$(\bar{V}_s - \bar{v}\Phi^0) \cdot \bar{n} = 0, \quad (x_0, y_0, z_0) \in S^0, \quad (4)$$

$$\sum \bar{P}_i = 0, \quad \sum \bar{M}_i = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi^0}{\partial z_0} = 0, \quad z_0 = H. \quad (6)$$

Если глубина фарватера неограничена, то (6) заменяется на

$$\lim_{z_0 \rightarrow \infty} \bar{v}\Phi^0 = 0.$$

Кроме перечисленного, требуется выполнение принципа излучения, согласно которому поток энергии волн, возмущенных судном, на-

правлен от судна на бесконечность. При движении на регулярном волнении колебания судна и жидкости периодичны.

В (2)-(5) поверхность Σ^0 описывается уравнением

$$\zeta^0 = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi^0}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 \right) \text{ при } z_0 = \zeta^0, \quad (7)$$

\vec{P}_i, \vec{M}_i – составляющие главного вектора и главного момента, действующие на судно, g – ускорение силы тяжести, \vec{v}_s – вектор скорости точки поверхности S^0 корпуса, \vec{n} – орт внешней нормали к этой поверхности,

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_0^2}; \quad \vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x_0} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y_0} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z_0} \vec{k}.$$

В (5) входят силы веса, инерции масс, упора движителя и гидродинамические силы. Последние однозначно определяются потенциалом Φ^0 .

Краевая задача (2)-(6) чрезвычайно сложна.

Во-первых, область определения потенциала Φ^0 нестационарна и заранее неизвестна, поскольку её границы – свободная поверхность жидкости и смоченная поверхность судна – постоянно меняются. Положение этих границ сложным образом зависит от характеристик движения судна и жидкости, которые должны быть найдены в результате решения задачи. Во-вторых, граничные условия (3) и (5) нелинейны относительно производных искомого потенциала Φ^0 . Наконец, до настоящего времени неизвестна точная формулировка "принципа излучения" для задач общего вида.

Поэтому решение задачи (2)-(6) без введения упрощающих предположений в настоящее время, по-видимому, неосуществимо. Наиболее естественным предположением такого типа является допущение о малости возмущенного движения жидкости. Это физическое предположение с помощью математического аппарата разложения искомых функций в ряды по степеням малых параметров позволяет привести нелинейную задачу к последовательности линейных краевых задач.

Подобный подход успешно реализован при решении аналогичных нелинейных задач: о волнообразовании и волновом сопротивлении судна, движущегося на тихой воде [5, 6], о прогрессивных волнах конечной амплитуды [7]; о нелинейных колебаниях жидкости в сосудах [8].

Линеаризация с помощью разложения по малому параметру задачи о потенциале скоростей, возмущенных колебаниями тела на свободной поверхности идеальной тяжелой жидкости бесконечной глубины, была впервые выполнена Ф. Джоном [9, 10]. Питерс и Стокер [1, 2, 11] применили разложение по малому параметру для решения задач о качке движущегося судна, но некоторые из полученных ими результатов противо-

речат физической картине изучаемого явления. Значительно более обоснованным является подход Дж. Ньюмана [12, 13], который для решения этой задачи использовал три независимых малых параметра. В.В.Лутовский детально исследовал задачу о бортовой и продольной качке конечной амплитуды [4, 14, 15], применяя двухпараметрические разложения. Анализ подходов к выбору малых параметров для решения нелинейных задач гидродинамической теории качки приведен в [4] и [15]. Из этого анализа, в частности, следует, что наиболее удачный выбор обеспечивает учет основных особенностей решения гидродинамической задачи уже в первом (линейном) приближении. Немалую роль играет такой субъективный фактор, как техническая оснащенность исследователя. Так, сначала Ли [16], а затем Поташ [17], имея мощные вычислительные средства, успешно применили однопараметрическое разложение для решения задачи о нелинейных колебаниях контура на свободной поверхности жидкости.

Таким образом, сейчас вопрос о необходимом числе малых параметров не нашел окончательного разрешения и, как отметил В.В. Луговский, «на этот вопрос ответит будущее» [15. С.28]. Опыт использования результатов гидродинамической теории свидетельствует [18, 19, 20, 21, 22], что гидродинамические и кинематические характеристики вертикальной, килевой, поперечно-горизонтальной качки и рыскания, определенные на основе решений соответствующих линейных краевых задач, вполне приемлемы для практических целей.

Ю.Л. Воробьев выполнил линеаризацию краевой задачи (2)-(6) так, что линейные задачи первого приближения позволяют получить все гидродинамические характеристики качки. Примененный им подход соответствует методологии М.Д. Хаскинда [20] и отличается от подходов А. Питерса и Дж. Стокера [11], Дж. Ньюмана [13] и Ю.В. Ремеза [23]. Линеаризация осуществляется в два этапа.

На первом этапе Ю.Л. Воробьевым не делалось каких-либо допущений о форме корпуса и рассматривались возмущения жидкости, связанные только с качкой судна. Считая колебания судна при качке устойчивыми и крутизну набегающих волн малой порядка δ , амплитуды колебаний судна и жидкости полагались малыми. Этого предположение достаточно для линеаризации задачи о неустановившемся возмущенном движении жидкости. Второй этап был связан с введением такой специализации формы корпуса, которая позволила считать малыми возмущения жидкости при установившемся движении судна.

На первом этапе линеаризации в соответствии с предположением о малости амплитуды колебаний судна и жидкости при качке Ю.Л. Воробьев предложил искать потенциал $\Phi^0(x_0, y_0, z_0, t) = \Phi_0(x', y', z', t)$ в виде суммы

$$\Phi_0(x', y', z', t) = v\varphi_0(x', y', z') + \Phi(x', y', z', t). \quad (8)$$

Рассмотрим ход решения Юрия Леонидовича. Потенциал φ_0 описывает возмущения жидкости, вызванные движением судна вдоль оси x_0 с единичной установившейся скоростью, потенциал $\Phi(x', y', z', t)$ – неустановившееся возмущенное движение жидкости, вызванное волнением и качкой судна, причем $\varphi_0 = 0(1)$, $\Phi = 0(\delta)$.

На основании (2)-(6), потенциал φ_0 – гармоническая в области, занятой жидкостью, функция, удовлетворяющая системе граничных условий, для компактной записи которых введен в рассмотрение вектор \vec{W} скорости движения жидкости относительно подвижной системы координат

$$\vec{W} = v\vec{\nabla}(\varphi_0 - x'). \quad (9)$$

На смоченной поверхности S_0 , соответствующей динамической посадке судна, идущего на тихой воде, имеет место условие непротекания и безотрывного обтекания

$$\vec{W} \cdot \vec{n} = 0, \quad x', y', z' \in S_0. \quad (10)$$

На свободной поверхности Σ_0 , описываемой уравнением

$$\zeta_0 = \frac{1}{2g}(W^2 - v^2), \quad \text{при } z' = \zeta_0, \quad (11)$$

граничное условие (3) принимает вид

$$\frac{1}{2}\vec{W} \cdot \vec{\nabla}(W^2) - g \frac{\partial \Phi_0}{\partial z'} = 0, \quad x', y \in \Sigma_0, \quad (12)$$

причем $W = |\vec{W}|$.

На дне водоема при $z' = H$

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial z'} = 0. \quad (13)$$

Если глубина фарватера неограничена, то условие (13) приобретает вид $\lim_{z' \rightarrow \infty} \vec{W} = -v\vec{i}$.

Следуя процедуре, описанной в [24], представление (8) подставлялось в граничное условие (3). Удерживая члены, имеющие порядок малости не выше δ , было получено приближенное граничное условие

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\vec{W} \cdot \vec{\nabla}(W^2) = g \frac{\partial \varphi_0}{\partial z'} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + 2\vec{W} \cdot \vec{\nabla} \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial t} \right) + \\ + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}(\vec{W} \cdot \vec{\nabla} \Phi) + \frac{1}{2}\vec{\nabla} \Phi \cdot \vec{\nabla}(W^2) - g \frac{\partial \Phi}{\partial z'} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

которое выполняется на свободной поверхности $z' = \zeta(x', y', t)$.

Подставляя (8) в (7) и отбрасывая члены $O(\delta^2)$, было получено

$$\zeta = \frac{1}{g} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (W^2 - v^2) + \vec{W} \cdot \vec{\nabla} \Phi \right] \text{ при } z' = \zeta_0. \quad (15)$$

Поскольку $|\zeta - \zeta_0| = O(\delta)$, значение ζ было разложено в ряд Тейлора относительно ζ_0 . Удерживалось два первых члена ряда, с учетом (11), было найдено

$$\zeta = \zeta_0 + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \vec{W} \cdot \vec{\nabla} \Phi \right) \Big|_{z'=\zeta_0} - \frac{1}{g} (\zeta - \zeta_0) \left(\vec{W} \cdot \frac{\partial \vec{W}}{\partial z'} \right) \Big|_{z'=\zeta_0}. \quad (16)$$

Из (16) следует [25]

$$\zeta = \zeta_0 + \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \vec{W} \cdot \vec{\nabla} \Phi}{g + \vec{W} \cdot \frac{\partial \vec{W}}{\partial z'}} \Big|_{z'=\zeta_0}. \quad (17)$$

Первое слагаемое в (17) описывает свободную поверхность жидкости при установившемся движении судна на тихой воде, второе – возмущение этой поверхности, вызванное набегающим волнением и качкой. Разлагая в ряды Тейлора относительно ζ_0 функции, входящие в (14), опуская слагаемые $O(\delta^2)$ и учитывая (12), было получено граничное условие для потенциала $\Phi(x', y', z', t)$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \vec{W} \cdot \vec{\nabla} \Phi}{g + \vec{W} \cdot \frac{\partial \vec{W}}{\partial z'}} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z'} (\vec{W} \cdot \vec{\nabla} W^2) - g \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial (z')^2} \right] + \\ & + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + 2 \vec{W} \cdot \vec{\nabla} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) + \\ & + \vec{W} \cdot \vec{\nabla} (\vec{W} \cdot \vec{\nabla} \Phi) + \frac{1}{2} \vec{\nabla} \Phi \cdot \vec{\nabla} (W^2) - g \frac{\partial \Phi}{\partial z'} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Это условие линейно относительно Φ и выполняется на свободной поверхности ζ_0 .

Далее Ю.Л.Воробьевым было рассмотрено граничное условие (4) на смоченной поверхности S_0 движущегося и качающегося судна. Скорость \vec{V}_s точки корпуса была представлена в виде суммы

$$\vec{V}_s = v\vec{i} + \frac{dD}{dt} \quad (19)$$

Дифференцирование по времени выполнялось в жестко связанной с судном системе координат xuz , \vec{D} – вектор перемещения точки поверхности корпуса. Вследствие допущения о малости амплитуд качки

$$\vec{D} = \vec{\chi} + \vec{\Omega} \times \vec{r}, \quad (20)$$

где $\vec{\chi}$ и $\vec{\Omega}$ – малые нестационарные линейные и угловые перемещения судна, \vec{r} – радиус-вектор точки поверхности корпуса в жестко связанной с судном системе координат xuz . Подставляя (19) и (8) с учетом (9) в (4), были получено граничное условие для потенциала Φ

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{d\vec{D}}{dt} \cdot \vec{n} - \vec{W} \cdot \vec{n}, \quad (21)$$

которое выполняется на поверхности S_0 движущегося и качающегося судна.

Заметим, что $\vec{W} \cdot \vec{n} = 0$ на поверхности S_0 , соответствующей динамической посадке судна, идущего на тихой воде, а на поверхности S_0 $\vec{W} \cdot \vec{n} = 0(D)$. Второе слагаемое правой части (21) обусловлено взаимодействием полей скорости жидкости, возникающих при ходе судна на тихой воде и при его малых колебаниях. В [25] показано, что с точностью до слагаемых $0(D)$ из условия (21) следует граничное условие

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \left[\frac{d\vec{D}}{dt} + \vec{\nabla} \times (\vec{D} \times \vec{W}) \right] \cdot \vec{n}, \quad (22)$$

которое выполняется с одинаковой точностью как на S^0 , так и на S_0 .

Граничное условие, аналогичное (22), использовалось Дж. Ньюманом в [12, 13, 26, 27]. Следует отметить, что при решении гидродинамических задач о качке с учетом скорости хода М.Д. Хаскинд [20] и Т. Хавелок [28] использовали граничное условие на корпусе без второго слагаемого в правой части (22). Строгое обоснование необходимости учета этого слагаемого в граничном условии и анализ неточности решений, полученных без его учета, приведены в [29].

На первом этапе линеаризации, в предположении о том, что поле $\vec{W} = v\vec{\nabla}(\varphi_0 - x')$ известно, для потенциала скоростей, вызванных набегающим волнением и качкой судна, получены линейные граничные условия (13) и (22).

Рассмотрим, как Ю.Л. Воробьевым была решена краевая задача о потенциале скоростей, возмущенных движением судна на тихой воде. Это классическая нелинейная задача теории волнового сопротивления, сложность которой не позволяет в настоящее время получить эффективное решение без серьезных упрощающих допущений.

Второй этап линеаризации общей задачи (2)-(6) состоял в построении линейного приближения краевой задачи для потенциала φ_0 . Возмущения, вызываемые в жидкости надводным судном, движущимся с конечной скоростью, малы, если форма его корпуса специализирована. Известны три варианта этой специализации, соответствующие математическим моделям тонкого, плоского и удлиненного судов.

Модель тонкого судна предполагает, что $B/L = 0(\varepsilon)$, $T/L = 0(1)$, $\varepsilon \ll 1$, L , B , T – длина, ширина и осадка судна соответственно, а касательная плоскость в любой точке его поверхности составляет малый угол с диаметральной плоскостью $y = 0$. Модель тонкого судна была впервые введена Дж.Мичелем [30]. Модель плоского судна предполагает, что $T/L = 0(\varepsilon)$, $B/L = 0(1)$, а плоскость, касательная к поверхности корпуса, составляет малый угол с плоскостью ватерлинии $z = 0$. Модель плоского судна впервые рассматривалась в [1], но применения не получила в связи с большой сложностью соответствующей линейной краевой задачи.

Модель удлиненного судна предполагает, что $B/L = 0(\varepsilon)$ и $T/L = 0(\varepsilon)$ одновременно, а продольные расстояния, на которых происходят изменения формы корпуса, конечны. Модель удлиненного судна была впервые введена и детально изучена М.Д. Хаскиндом [20], а затем многими советскими и зарубежными исследователями.

Если принять, что форма реального судна соответствует одной из трех описанных выше математических моделей, то возмущения жидкости, вызванные его движением с конечной скоростью на тихой воде, могут считаться малыми, и тогда

$$\varphi_0 = 0(\varepsilon), \quad \vec{W} = -v\vec{i} + 0(\varepsilon), \quad \zeta = 0(\varepsilon), \quad (23)$$

а S_0 обращается в смоченную поверхность S при плавании судна на тихой воде без хода. В этом случае граничное условие (18) принимает вид, хорошо известный в теории волн малой амплитуды

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - 2v \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t} + v^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = 0. \quad (24)$$

Граничное условие (22) тоже упрощается

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \left[\frac{d\vec{D}}{dt} - v(\vec{\Omega} \times \vec{i}) \right] \cdot \vec{n}, \quad (x, y, z) \in S. \quad (25)$$

Условие (25) выполняется на неподвижной смоченной поверхности S корпуса в среднем положении (как на тихой воде). Второе слагаемое в правой части учитывает то, что граничное условие для потенциала φ_0 выполняется не на качающемся, а на неподвижном корпусе и то, что при повороте судна вокруг осей y' и z' за счет взаимодействия с про-

дольным поступательным потоком возникает дополнительное поперечное течение. Если рассматривается качка судна, не имеющего хода, то

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0; \quad (26)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{d\vec{D}}{dt} \cdot \vec{n}, \quad (x, y, z) \in S. \quad (27)$$

Заметим, что условия (25) и (27) можно получить без специализации формы корпуса судна, так как при $v = 0$ в (18) и (22) следует принять $\varphi_0 = 0$, $\vec{W} = 0$. Однако и в этом случае математические модели тонкого или удлиненного судов оказываются необходимыми для получения эффективных решений краевых задач о потенциале скоростей, возмущенных качкой судна.

Набегающие на судно регулярные волны малой амплитуды r_0 вызывают его малые гармонические колебания. В этом случае векторы линейного $\vec{\chi}$ и углового $\vec{\Omega}$ перемещений из (20) можно представить в виде

$$\vec{\chi} = e^{i\sigma t} (\vec{i} a_1 + \vec{j} a_2 + \vec{k} a_3); \quad \vec{\Omega} = e^{i\sigma t} (\vec{i} a_4 + \vec{j} a_5 + \vec{k} a_6), \quad (28)$$

удерживая здесь и ниже в окончательных выражениях только действительную часть. Величины a_j – комплексные амплитуды продольно-горизонтальной ($j = 1$), поперечно-горизонтальной ($j = 2$), вертикальной ($j = 3$), бортовой ($j = 4$), килевой ($j = 5$) качки и рыскания ($j = 6$).

В силу линейности краевой задачи для потенциала Φ допустимо его представление в виде суммы

$$\Phi = \left[r_0 (\Phi_0 + \Phi_7) + \sum_{j=1}^6 a_j \Phi_j \right] e^{i\sigma t}, \quad (29)$$

где Φ_0 – потенциал набегающего волнения единичной амплитуды;

Φ_7 – потенциал дифрагированного волнового движения;

Φ_j – функции излучения для различных видов колебаний.

Заметим, что в последующем обозначения $\Phi_0, \Phi_j (j = 1 \div 6), \Phi_7$ с соответствующими оговорками применяются для потенциалов, относящихся к полным (а не единичным) амплитудам колебаний.

Гидродинамическое давление в жидкости определяется линеаризованным интегралом Лагранжа-Коши. Поэтому действующие на судно гидродинамические силы и моменты можно определять отдельно для каждой составляющей потенциала Φ . Гидродинамические силы и моменты, вызванные качкой судна, идущего на тихой воде, определяются составляющей

$e^{i\sigma t} \sum_{j=1}^6 a_j \Phi_j$ потенциала (29) в виде

$$F_p(t) = e^{i\sigma t} \sum_{j=1}^6 a_j t_{pj}, \quad (30)$$

где t_{pj} – комплекснозначная передаточная функция.

$$t_{pj} = \sigma^2 \lambda_{pj} - i\sigma \mu_{pj} - C_{pj}; \quad (p = 1 \div 6, \quad j = 1 \div 6), \quad (31)$$

где $\lambda_{pj}, \mu_{pj}, C_{pj}$ – действительные функции формы корпуса, частоты ω и скорости хода V , являющиеся обобщенными присоединенными массами, коэффициентами демпфирования и восстанавливающих сил. Возмущающие силы и моменты $X_p e^{i\sigma t}$ действуют на некачающееся судно со стороны набегающих и дифрагированных волн (составляющие Φ_0 и Φ_7 , потенциала Φ), причем X_p – комплекснозначная функция формы корпуса и скорости хода судна, длины и направления набегающих волн. Полагая, что сила сопротивления воды движению судна равна тяге движителя, а дифференцирующий гидродинамический момент уравнивается моментом сил веса и поддержания, из динамических граничных условий (5), учитывая (30) и (31), получаем

$$\sum_{j=1}^6 [-\sigma^2 (M_{pj} + \lambda_{pj}) + i\sigma \mu_{pj} + C_{pj}] X_p, \quad (p = 1, 2, 3, \dots, 6), \quad (32)$$

где M_{pj} – матрица инерции масс судна. Система шести линейных уравнений (32) относительно неизвестных амплитуд качки a_j легко решается обращением комплекснозначной матрицы 6×6 .

$$\aleph_{pj} = -\sigma (M_{pj} + \lambda_{pj}) + i\sigma \mu_{pj} + C_{pj}. \quad (33)$$

Основное содержание гидродинамической теории качки состоит в определении матриц гидродинамических характеристик λ_{pj}, μ_{pj} и возмущающих сил $X_p (j = 1, 2, \dots, 6) (p = 1, 2, \dots, 6)$. Матрица коэффициентов восстанавливающих сил C_{pj} легко получается из теории плавучести и начальной остойчивости [33]. Составляющие потенциала Φ , необходимые для расчета гидродинамических характеристик λ_{pj}, μ_{pj} и возмущающих сил X_p , являются решениями сформулированных выше задач.

Используемые в настоящее время методы решения таких задач можно условно разбить на три группы. К первой группе относятся численные методы прямого определения потенциала скоростей и его производных в конечном числе точек из области определения. Методы второй группы связаны с введением гипотезы плоского обтекания. Третья группа объединяет методы, в которых более или менее систематически используется аппарат теории возмущений, а полученные окончательные результаты зависят от принятых допущений.

Прямое численное определение потенциала скоростей жидкости, возмущенных качкой судна, основывается на использовании конечно-разностных методов решения краевых задач в частных производных [31, 32], либо метода конечных элементов [34, 35].

Гипотеза плоского обтекания и основанный на ней метод плоских сечений возникли и развились в связи с фундаментальными исследованиями М.Д. Хаскинда [20]. Применение гипотезы плоского обтекания серьезно упрощает трехмерную краевую задачу для потенциала возмущенных скоростей жидкости, сводя ее к совокупности двумерных. Впервые плоскую задачу об установившихся колебаниях тела под свободной поверхностью тяжелой жидкости рассмотрел Н.Е.Кочин в 1935 г. [36]. Аналогичную по постановке задачу для мелководья решил в 1942 г. М.Д. Хаскинд [37]. Позднее он возвращался к проблеме определения потенциала возмущенных скоростей при качке шпангоутного контура в работах [38] и [39]. За рубежом первая работа этого направления была опубликована Урселлом в 1949 г. [40]. В течение последних трех десятилетий сфера использования метода плоских сечений неизменно расширялась, а его элементы постоянно совершенствовались. Теория и практика применения метода плоских сечений связаны с необходимостью решения двух принципиальных проблем: проблемы определения гидродинамических характеристик (ГДХ) качки шпангоутных контуров и проблемы использования решений двумерных задач для расчета кинематических характеристик (КХ) качки судна. Первая из упомянутых проблем интенсивно исследовалась в нашей стране и за рубежом. Заметим, что в этой проблеме основное внимание уделяется решению задачи излучения, т.е. отысканию потенциала скоростей жидкости, возмущенных гармоническими колебаниями шпангоутного контура на глубокой воде. Из решения этой задачи определяются присоединенные массы и демпфирование. Что же касается возмущающих сил и моментов, то, в соответствии с гипотезой относительных скоростей и ускорений [41, 19, 33], они однозначно определяются через соответствующие значения присоединенных масс и демпфирования. Возмущающие силы, действующие на шпангоутный контур со стороны набегающего волнения, можно вычислить, не пользуясь гипотезой относительных скоростей и ускорений. Для этого достаточно применить соотношения Хаскинда-Ньюмана [24, 42], из которых следует связь возмущающих сил с силами волнового демпфирования. Для решения краевой задачи о потенциале скоростей жидкости, возмущенных колебаниями шпангоутного контура, применяются три основных метода: метод конформных преобразований [39, 43, 44, 45, 46, 47, 48]; метод функций Н.Е. Кочина [20, 36, 49, 50, 51], и метод особенностей [36, 37, 40, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65].

Проблема использования решений плоской задачи для расчета КХ качки судна детально исследовалась многими авторами. Узловыми для этой проблемы являются вопросы определения возмущающих сил и моментов и структуры уравнений качки судна на ходу.

Существует десять вариантов уравнений продольной качки судна на ходу, предложенные советскими и иностранными авторами. Большая часть коэффициентов этих уравнений совпадает, но некоторые из них отличаются у разных авторов, причем отличия имеют место лишь в случае хода судна. Отличия объясняются разными способами учета влияния хода судна на его гидродинамические характеристики, вычисленные с помощью метода плоских сечений. Возможность существования разных по структуре дифференциальных уравнений качки судна при одних и тех же базовых предположениях об удлиненности корпуса, линейности гидродинамической задачи и большой частоте возмущающего воздействия является свидетельством несовершенства гипотезы плоского обтекания и принципиальным недостатком метода плоских сечений. Свойственное этому методу полное пренебрежение пространственным характером обтекания корпуса представляется физически необоснованным даже при высоких частотах колебаний и отсутствии хода в задачах о качке на мелководье, качке катамаранного судна и, тем более, о качке судна на ходу. Другим недостатком метода плоских сечений является некорректность дифракционной задачи при косом набегании волн даже в случае отсутствия хода судна. Вычисление возмущающих сил по Хаскинду-Ньюману [42], с использованием потенциала скоростей судна полученного методом плоских сечений, также содержит элемент некорректности, поскольку применение этого метода предполагает отсутствие возмущенных скоростей жидкости перед судном и за ним, т.е. вне слоя $-L/2 \leq x \leq L/2$. Это противоречит физической картине явления и может привести к неточностям в расчете энергии, уносимой волнами на бесконечность. По этой же причине решения, полученные методом плоских сечений, не могут быть использованы, например, в задаче о влиянии качки судна на работу двигателя.

Отмеченные недостатки метода плоских сечений, не устраненные даже в его последних модификациях [66, 67] и др., стимулируют разработку и внедрение других подходов к изучению качки судна, основанных на последовательном применении методов теории возмущений. В связи с проблемой линеаризации были введены модели тонкого, плоского и удлиненного судов. Модели тонкого и удлиненного судов, получившие наибольшее распространение, служат не только для формулировки линейного приближения краевой задачи, но и для построения её решения. Математическая модель тонкого судна, впервые примененная для определения волнового сопротивления Дж. Митчелем [30], использовалась при решении задач о волновом сопротивлении в многочисленных работах Л.Н. Сретенского [7], А.А. Костюкова [3], В.Г. Сизова [5, 6] и других авторов. Ю.Л. Воробьевым в работах [68, 69, 70, 71, 72, 73] были исследованы некоторые особенности математической модели тонкого судна, а также предложены эффективные алгоритмы расчета волнового сопротивления на глубокой и мелкой воде как для тонкого судна, так и для его обобщения – «судна конечной ширины». Первая попытка использования

модели тонкого судна для изучения продольной качки, сделанная в работе [11] А. Питерсом и Дж. Стокером, не может считаться удачной, так как основные выводы этого исследования не соответствуют физической картине явления. Причина неудачи авторов была объяснена: Н.Н. Моисеевым [1], а Дж. Ньюман в [13] предложил уточненную линейную теорию качки тонкого судна, свободную от недостатков теории упомянутых авторов. Результаты расчетов ГДХ качки реальных судов, выполненных на основе решения Дж. Ньюмана [74], показали хорошее соответствие данным эксперимента. Это обстоятельство не дало, к сожалению, необходимого толчка для детального исследования вычислительных аспектов проблемы и внедрения в практику расчетного метода определения ГДХ продольной качки на основе модели тонкого судна. В это же время исследования различных задач гидродинамической теории с применением этой модели продолжались. В.К. Анкудинов [75, 76] рассмотрел качку тонкого судна на мелководье как на тихой воде, так и на волнении, выписал весьма сложные по структуре выражения для потенциала скоростей и гидродинамических сил, но не произвел каких-либо расчетных оценок. Ю.В. Ремез [23, 77] распространил подход Дж. Ньюмана [13] на случай качки судна, движущегося под произвольным курсовым углом к набегающему волнению, и получил полное решение соответствующей гидродинамической задачи. Однако это решение осталось нереализованным, так как никаких расчетов на его базе выполнено не было. Теоретическое решение задачи о движении тонкого судна на мелководье приведено также в [78]. Оригинальные исследования различных задач качки тонкого судна выполнены сотрудниками Николаевского кораблестроительного института Л.М. Дыхтой, Е.М. Коганом, В.А. Степановым [79, 80, 81] на основе использования современного и эффективного математического аппарата. Но и эти решения также не были реализованы. Сложившаяся после работ Дж. Ньюмана [12, 13] практика использования модели тонкого судна для решения задач гидродинамической теории качки характеризуется с одной стороны постоянным усложнением рассматриваемых проблем (качка судна, движущегося на волнении по круговому пути, качка судна в жидкости переменной глубины и т.д.) и полным отсутствием численного анализа полученных результатов с другой. Это породило негативное отношение части специалистов к самой идее использования модели тонкого судна для практических расчетов ГДХ качки. Ю.Л. Воробьевым модель тонкого судна использована для получения решений ряда задач о качке, которые реализованы в виде программ расчета на ЭВМ. По этим программам выполнены массовые расчеты ГДХ и возмущающих сил (ВС).

Математическая модель удлиненного судна, применяемая с начала 30-х годов в аэродинамике самолетов и ракет [82], была введена в гидродинамическую теорию качки М.Д. Хаскиндом [20], который учел важную особенность обычных транспортных судов: исключая небольшие районы в носу и корме, форма и площадь поперечного сечения их корпусов медленно меняются по длине. М.Д. Хаскинд, специально это не обосновывая,

применил для решения гидродинамических задач о качке удлиненного судна метод плоских сечений. Основные результаты, полученные этим методом, также как и его недостатки, были рассмотрены выше.

Стремление улучшить решения гидродинамических задач получило необходимый научный фундамент в связи с совершенствованием методов теории возмущений и, в частности, метода сращиваемых асимптотических разложений (метода CAP) [83, 84, 85]. Процедура указанного метода в задачах гидродинамической теории качки состоит в следующем. Вся область, занятая жидкостью, разделяется на две зоны – «внешнюю» и «внутреннюю». Потенциал возмущенных скоростей жидкости определяется отдельно в каждой из зон, и полученные выражения сращиваются на их границе.

Такая схема решения гидродинамических задач была впервые применена в работах Ф. Урселла [86], Е. Така [87], В. Джусена [88] в начале шестидесятых годов. Главным недостатком полученных результатов было их несоответствие экспериментальным данным при умеренных и высоких частотах колебаний. Такое несоответствие объясняется неполным учетом «волнового» характера условия на свободной поверхности при рассмотрении краевой задачи во внутренней области, когда на свободной поверхности принято граничное условие типа «твердой стенки». Нетрудно видеть, что такое условие соответствует предположению о малости частот колебаний («длинноволновая асимптотика»). Детальный анализ этого подхода выполнен в фундаментальной работе Дж. Ньюмана и Е. Така [89], где предпринята попытка улучшить результаты.

Необходимость дальнейшей разработки и совершенствования методов решения гидродинамических задач со свободной поверхностью при помощи асимптотической теории подчеркивается в обзоре [90]. Попытка принципиально улучшить решение гидродинамической задачи методом CAP, отказавшись от условия типа «твердой стенки» во внутренней краевой задаче, сделана в 1970 г. Х. Маруо [109]. Внешняя задача решается им с помощью линейного распределения источников, как это обычно принято [90]. Задача во внутренней зоне становится двумерной, но краевые условия на бесконечном удалении от шпангоутного контура не совпадают с принятыми в методе плоских сечений ("принцип излучения"). Предполагая, что решение краевой задачи метода плоских сечений известно и представлено по Урселлу [40] в виде суммы потенциалов источника (диполя) и бесконечного ряда мультиполей, Х.Маруо получает из него решение краевой задачи для внутренней зоны. Процедура построения этого решения весьма сложна, поскольку необходимо определение численным методом интенсивностей источника (диполя) и бесконечного числа мультиполей. По этой причине предложенный метод не реализован численно, хотя его разработка была продолжена в [91]. Следует отметить, что решение Х. Маруо явилось первой попыткой корректного учета «волнового» характера краевого условия для потенциала скоростей на свободной поверхности жидкости при решении краевой задачи

гидродинамической теории качки методом САР. Аналогичная попытка была предпринята позднее Х. Мотошима [92], но вычисления выполнены им для цилиндрического тела с прямоугольной формой поперечного сечения, причем процедура расчета не описана. Приводятся лишь рассуждения о принципиальной возможности решения внутренней задачи численными методами. Хорошее совпадение результатов теоретического и экспериментального определения сил, действующих на судно со стороны набегающего волнения, позволяет сделать вывод об эффективности модели удлиненного судна и метода САР для решения гидродинамической задачи о качке судна. Исследование дифракции волн на неподвижном и движущемся судне и определение волновых нагрузок с помощью метода САР выполнено А. Трешем [93] и Р. Беком и А. Трешем [94]. Во внешней задаче использовалось линейное распределение волновых источников и диполей. Внутренняя задача, в которой учтен «волновой» характер граничного условия на свободной поверхности, решена с помощью распределения источников по контуру шпангоута. Интенсивность этих источников определяется численным методом, и это приводит к громоздкости и сложности окончательных результатов.

Описанные выше работы посвящены рассмотрению качки судна на глубокой воде. Гидродинамическая задача о качке «удлиненного» судна на мелководье исследовалась иным путем. Было принято предположение о том, что глубина фарватера мало отличается от осадки, а длина набегающих волн имеет порядок длины судна. Иначе говоря, отыскивалась длинноволновая асимптотика на «значительном» мелководье. Принятые предположения позволили серьезно упростить решение внутренней задачи, а внешнюю привести к стандартной задаче об определении функции, удовлетворяющей уравнению Гельмгольца и «принципу излучения» в плоскости с исключенным отрезком по скачку функции и её нормальной производной при переходе через этот отрезок. Таким методом задачу о продольной и поперечной качке судна без хода решил Е. Так [95], задачи о продольной качке судна в докритической и закритической зонах скоростей хода – Ю.Л. Воробьев [96, 97, 98]. Позднее продольную качку судна, идущего в докритической и закритической зонах скоростей, исследовал А. Плоткин [99, 100]. Описанный метод используется для решения задач о движении удлиненного судна на тихой воде по значительному мелководью и в каналах [101, 102, 103, 104,105], а также двух удлиненных судов, взаимодействующих при обгонах и расхождениях.

Практика применения метода САР для решения гидродинамических задач показала его широкие возможности, и недостаточный уровень разработки специфических вопросов его использования в задачах со свободной поверхностью.

На основе глубокого анализа состояния проблемы определения ГДХ качки судна с точки зрения применяемых методов и полученных результатов Юрий Леонидович Воробьев отдал предпочтение методу САР для решения задач гидродинамической теории. В методе САР он увидел:

- принципиальную возможность решения широкого класса гидродинамических задач как в линейной, так и в нелинейной постановке;
- единую методическую основу для эффективного решения задач о качке на глубокой воде и мелководье, как при ходе судна, так и без хода;
- универсальную процедуру решения гидродинамических задач для моделей тонкого и удлиненного судов;
- возможность разделения области определения искомого потенциала скоростей на отдельные зоны, в каждой из которых краевая задача значительно упрощается, что обеспечивает серьезное упрощение решения всей задачи;
- возможность получить для многих гидродинамических задач замкнутые аналитические решения, что открывало дополнительные возможности постановки и исследования задач гидродинамической оптимизации, а также их использования для автоматизации проектирования.

До работ Ю.Л. Воробьева преимущества метода САР практически не использовались. Это не было связано с какими-либо скрытыми дефектами метода, а полностью объяснялось неудачной практикой его применения. Ю.Л. Воробьевым было выделено три первоочередных направления совершенствования практики использования метода САР для развития гидродинамической теории качки судна:

- улучшение процедуры сращивания решений краевых задач во внешней и внутренней областях на их границе;
- разработка эффективного и простого по структуре решения внутренней задачи, обеспечивающего полный учет ее «волнового характера»;
- упрощение метода определения сил, действующих на судно при качке.

Применение метода САР базируется на предположении о существовании «области перекрытия» решений задачи во внутренней и внешней зонах. В этой области разложения решений по соответствующим переменным согласовываются с точностью до определенного порядка. Следуя этому принципу, можно назначить «область перекрытия» (в частном случае – границу внешней и внутренней зон) так, чтобы упростить процедуру сращивания решений.

Сущность разработанной Ю.Л. Воробьевым модификации метода САР проиллюстрируем на примере полученного им решения [106] достаточно простой задачи гидродинамической теории о потенциале скоростей жидкости, возмущенных малыми гармоническими колебаниями поверхности тела в безграничной идеальной несжимаемой жидкости.

Решение задачи Ю.Л. Воробьев получил для двух разных допущений о его форме, считая тело один раз тонким, другой – удлиненным.

Пусть тело, симметричное относительно плоскости xz , поверхность S которого описывается уравнением

$$y = y_0(x, z, \varepsilon), \quad (34)$$

где ε – малый параметр, колеблется с малой амплитудой a и частотой σ так, что точки S имеют вертикальную скорость v_z , равную

$$v_z = \begin{cases} a \cos \sigma t, & y > 0, \\ -a \cos \sigma t, & y < 0. \end{cases} \quad (35)$$

Искомый потенциал $\varphi(x, y, z, t)$ возмущенных скоростей жидкости был представлен в виде

$$\varphi(x, y, z, t) = a\Phi(x, y, z) \cos \sigma t, \quad (36)$$

для $\Phi(x, y, z)$ была получена краевая задача в области E , занятой жидкостью

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Phi(x, y, z) = 0, \quad x, y, z \in E \quad (37)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \left| \cos(n, z) \right| = \frac{\left| \frac{\partial y_0}{\partial z} \right|}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial y_0}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial y_0}{\partial x} \right)^2}} \quad \text{на } y = y_0(x, z, \varepsilon), \quad (38)$$

$$\Phi(x, y, z) \rightarrow 0, \quad x^2 + y^2 + z^2 \rightarrow \infty. \quad (39)$$

Здесь $\partial/\partial n$ означает дифференцирование по внешней нормали \vec{n} к поверхности S (34).

Рассмотрим полученное Ю.Л. Воробьевым решение краевой задачи (37)-(39), в предположении, что тело является удлиненным. В соответствии с процедурой метода CAP область E была разделена на две зоны – внешнюю, где $y, z \sim 0(1)$ и внутреннюю, где $y, z \sim 0(\varepsilon)$. При $\varepsilon \rightarrow 0$ наблюдатель, находящийся во внешней зоне, отмечает превращение тела в отрезок $[-L/2, L/2]$ оси $0x$ (L – длина тела). Искомый потенциал для фиксированных x, y, z при $\varepsilon \rightarrow 0$ в был представлен виде ряда

$$\Phi(x, y, z) \sim \sum_{m=1}^M \varepsilon^m \Phi_m(x, y, z). \quad (40)$$

В соответствии с (37) и (38) решения внешней задачи $\Phi_m(x, y, z)$ являются гармоническими, исчезающими на бесконечности функциями. Такие функции либо оказываются константами, либо имеют особенности в области определения [107]. Отрезок $[-L/2, L/2]$ оси $0x$ является линией особенностей для потенциалов Φ_m . Плотность особенностей не может быть определена из решения внешней задачи, поскольку условие (38), относящееся к внутренней зоне, во внешней зоне утрачивается. Учитывая симметрию потенциала $\Phi(x, y, z) = \Phi(x, -y, z)$, $y > 0$, которая следует из симметрии возмущенного движения жидкости, можно лишь утверждать,

что на линии особенностей расположены источники (стоки) и мультиполи четного порядка ($n = 2, 4, 6, \dots$). Аналогичное по структуре распределение особенностей возникает при решении задачи о поступательном движении удлиненного тела в жидкости. Используя полученные в [108] результаты, было найдено

$$\Phi_m = -\frac{1}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\sigma_m(\xi) d\xi}{[(x-\xi)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{2n,m}(x, y, z). \quad (41)$$

В (41) $\sigma_m(x)$ – производительность пространственного источника, а $\Phi_{2n,m}$ – потенциалы мультиполей четного порядка. Источник и мультиполи расположены на отрезке $[-L/2, L/2]$ оси Ox . Двучленное разложение потенциала $\Phi(x, y, z)$ на внутренней границе внешней зоны, т.е. при малых $r = \sqrt{y^2 + z^2}$ было найдено в виде

$$\Phi(x, y, z) \sim \frac{1}{2\pi} \sigma_1(x) \ln r - \frac{1}{4\pi} F(x), \quad (42)$$

$$F(x) = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{d\sigma_1(\xi)}{d\xi} \ln 2|x-\xi| \operatorname{sign}(x-\xi) d\xi. \quad (43)$$

Для решения внутренней задачи Ю.Л. Воробьевым были введены «растянутые» координаты

$$x = x, Y = y/\varepsilon, Z = z/\varepsilon \quad (44)$$

Из (37) и (38) было найдено

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \right) \Phi(x, Y, Z, \varepsilon) = -\varepsilon^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Phi(x, Y, Z, \varepsilon), \quad (45)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} \Phi(x, Y, Z, \varepsilon) = \varepsilon \cos(N, Z) + O(\varepsilon^3), \quad (46)$$

где $\frac{\partial}{\partial N}$ – оператор дифференцирования по внешней нормали к шпангоутному контуру $\mathfrak{Z}(x)$ с абсциссой x . Граничное условие (39), имеющее смысл лишь во внешней зоне, для внутренней задачи утрачивается.

Потенциал $\Phi(x, Y, Z, \varepsilon)$ был представлен в виде ряда

$$\Phi(x, Y, Z, \varepsilon) \sim \sum_{n=1}^N \varepsilon^n \Phi_n(x, Y, Z) \quad (47)$$

при фиксированных x, Y, Z и $\varepsilon \rightarrow 0$.

Из (44) и (45) с учетом (47) для потенциала Φ_1 была получена двумерная краевая задача

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \right) \Phi_1(x, Y, Z) = 0, \quad Y, Z \in E_x; \quad (48)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} \Phi_1(x, Y, Z) = |\cos(N, Z)|, \quad Y, Z \in \mathfrak{Z}_x. \quad (49)$$

Абсцисса x здесь рассматривалась как параметр, E_x – внешность шпангоутного контура $\mathfrak{Z}(x)$.

Решение Φ_1 внешней задачи Неймана (48)-(49) с точностью до произвольной постоянной было выписано с помощью метода Урселла-Торна [40], [65] в виде линейной комбинации плоских источника и мультиполей, интенсивности которых определялась так, чтобы выполнялось условие (49)

$$\Phi_1(x, Y, Z) = C_1(x) + \frac{A_1(x)}{2\pi} \ln \sqrt{Y^2 + Z^2} + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_{2m,1}(x, Y, Z). \quad (50)$$

Здесь

$$A_1(x) = \oint_{\mathfrak{Z}_x} |\cos(NZ)| dl = 2B(x), \quad (51)$$

$B(x)$ – ширина контура \mathfrak{Z}_x , измеренная в линейном масштабе внутренней зоны.

Двучленное разложение искомого потенциала Φ на внешней границе внутренней зоны, т.е. при больших значениях $\sqrt{Y^2 + Z^2}$, записанное во внешних переменных, было получено в виде:

$$\Phi(x, y, z) \sim C_1(x) + \frac{a_1(x)}{2\pi} \ln r. \quad (52)$$

Здесь $a_1(x)$ – удвоенная ширина шпангоутного контура \mathfrak{Z}_x , измеренная в масштабе внешней зоны.

Заключительная операция метода CAP состояла в сращивании решений задач во внешней и внутренней зонах на их границе. Используя принцип предельного сращивания [83], согласно которому «внутренний предел внешнего предела равен внешнему пределу внутреннего предела», из (42), (43) и (52) было найдено

$$\sigma_1(x) = a_1(x), \quad (53)$$

$$C_1(x) = -\frac{1}{4\pi} F(x) = -\frac{1}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{d\sigma_1(\xi)}{d\xi} \ln 2|x - \xi| \text{sign}(x - \xi) d\xi. \quad (54)$$

Искомый потенциал $\Phi(x, y, z, \varepsilon)$ был представлен в виде

$$\Phi(x, y, z, \varepsilon) = -\frac{1}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{a_1(\xi) d\xi}{[(x - \xi)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} + o(\varepsilon^2). \quad (55)$$

В случае, когда используются значения потенциала Φ на поверхности тела, было удобнее применять представление (52), (53), (54).

Рассмотрим ход решения Ю.Л.Воробьева краевой задачи (37)-(39) с помощью метода САР, предполагая, что тело является «тонким». Учитывая «тонкость», уравнение (34) поверхности S было представлено в виде

$$y_0 = \varepsilon Y_0(x, z), \quad -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad -T \leq z \leq T. \quad (56)$$

Как и в предыдущем случае, область E разделялась на две зоны – внешнюю, где $y \sim 0(1)$ и внутреннюю, где $y \sim 0(\varepsilon)$. При $\varepsilon \rightarrow 0$ наблюдатель, находящийся во внешней зоне, отмечает превращение тела в пластину $\left\{ -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, y = 0, -T \leq z \leq T \right\}$. Для фиксированных во внешней зоне x, y, z при $\varepsilon \rightarrow 0$ искомый потенциал $\Phi(x, y, z, \varepsilon)$ был представлен в виде асимптотического ряда

$$\Phi(x, y, z, \varepsilon) \sim \sum_{n=1}^N \varepsilon^n \Phi_n(x, y, z). \quad (57)$$

Из (37) и (39) следует, что Φ_n , как гармоническая функция, убывающая до нуля на бесконечности, имеет особенности в плоскости $y = 0$. В связи с симметрией потенциала относительно плоскости $y = 0$, на этой плоскости расположен слой источников плотностью $\sigma_n(x, z)$, так что

$$\Phi_n(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^T \frac{\sigma_n(\xi, \zeta) d\xi d\zeta}{\left[(x-\xi)^2 - y^2 - (z-\zeta)^2 \right]^{3/2}}. \quad (58)$$

Учитывая свойства потенциала простого слоя [102], было выписано несколько первых членов разложения решения внешней задачи на границе с внутренней областью, т.е. при $y = 0(\varepsilon)$

$$\Phi(x, y, z, \varepsilon) = \Phi_1(x, 0, z) + \frac{1}{2} |y| \sigma_1(x, z) + \Phi_2(x, 0, z) + 0(\varepsilon^3). \quad (59)$$

Здесь первое слагаемое имеет порядок ε , второе и третье – порядок ε^2 .

Равенство (59) представляет собой двучленное внутреннее разложение двучленного внешнего разложения, записанное во внешних переменных.

При переходе к внутренней задаче, вводилась «растянутая» координата $Y = y/\varepsilon$, координаты X и Z оставались без изменения. Из (37) и (38) было получено

$$\frac{\partial^2}{\partial Y^2} \Phi(x, y, z, \varepsilon) = -\varepsilon^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Phi(x, Y, z, \varepsilon), \quad (60)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial Y^2} \Phi[x, \pm Y(x, z), z, \varepsilon] = \pm \varepsilon^2 \left| \frac{\partial Y_0(x, z)}{\partial z} \right| + 0(\varepsilon^4). \quad (61)$$

Естественно, что условие (39) во внутренней задаче не участвует.

Потенциал $\Phi(x, Y, z, \varepsilon)$ при фиксированных x, Y, z и $\varepsilon \rightarrow 0$ представлялся в виде ряда

$$\Phi(x, Y, z, \varepsilon) = \sum_{n=1}^N \varepsilon^n \Phi_n(x, Y, z). \quad (62)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_1(x, Y, z)}{\partial Y^2} = 0. \quad (63)$$

Из (60) и (61) была получена краевая задача для $\Phi_1(x, Y, z)$ во внутренней области

$$\frac{\partial^2}{\partial Y^2} \Phi_1[x, \pm Y_0(x, z), z] = 0 \quad (64)$$

Система (63), (64) допускает решение вида

$$\Phi_1(x, Y, z) = A_1(x, z), \quad (65)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial Y^2} \Phi_2(x, Y, z) = 0. \quad (66)$$

Краевая задача для $\Phi_2(x, Y, z)$ во внутренней области имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial Y} \Phi_2[x, \pm Y_0(x, z), z] = \pm \left| \frac{\partial Y_0(x, z)}{\partial z} \right|. \quad (67)$$

Из (66) следует, что

$$\Phi_2(x, Y, z) = A_2(x, z) + B_2(x, z)Y, \quad (68)$$

а из (67) было найдено

$$B_2 = \pm \left| \frac{\partial Y_0(x, z)}{\partial z} \right|. \quad (69)$$

Верхний знак в (69) соответствует области $Y > 0$, а нижний – области $Y < 0$. Из (62), (65), (68), (69) было получено следующее двучленное внешнее разложение двучленного внутреннего разложения, выраженное во внешних переменных

$$\Phi(x, y, z, \varepsilon) = A_1(x, z) + A_2(x, z) + \left| \frac{\partial Y_0(x, z)}{\partial z} \right| y + 0(\varepsilon^3). \quad (70)$$

Первое слагаемое в правой части равенства имеет порядок ε , второе и третье – порядок ε^2 . Сращивание решений внешней и внутренней задач выполнялось на основе принципа асимптотического сращивания [83], согласно которому « m -членное внутреннее разложение n -членного внешнего разложения равно n -членному внешнему разло-

жению m - членного внутреннего разложения». Принимая $n = m = 2$ и учитывая (59) и (70), было найдено

$$\begin{aligned} A_1(x, z) &= \Phi_1(x, 0, z), \quad A_2(x, z) = \Phi_2(x, 0, z); \\ \sigma_1(x, z) &= 2 \left| \frac{\partial y_0(x, z)}{\partial z} \right|. \end{aligned} \quad (71)$$

Последнее равенство в (71) полностью определяет потенциал $\Phi_1(x, y, z)$ (58) в виде

$$\Phi(x, y, z) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^T \frac{\left| \frac{\partial y_0(\xi, \zeta)}{\partial \zeta} \right| d\xi d\zeta}{\left[(x - \xi)^2 + y^2 + (z - \zeta)^2 \right]^{3/2}}. \quad (72)$$

Если используются значения потенциала на теле, удобно брать

$$\Phi(x, y, z, \varepsilon) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^T \frac{\left| \frac{\partial y_0(\xi, \zeta)}{\partial \zeta} \right| d\xi d\zeta}{\left[(x - \xi)^2 + (z - \zeta)^2 \right]^{3/2}} + O(\varepsilon^2). \quad (73)$$

Рассмотренные выше гидродинамические задачи имеют практическую ценность. Их решения, в частности, дают хорошее первое приближение для потенциала скоростей, возмущенных низкочастотными продольными колебаниями судна на глубокой воде. Однако, решая эти задачи, Ю.Л. Воробьев ставил иные цели. Анализируя процедуру применения метода САР к решению упрощенной гидродинамической задачи, он подчеркнул ряд интересных его особенностей, не отмеченных другими исследователями и показал возможность совершенствования практики использования метода в гидродинамической теории качки судна.

Прежде всего Ю.Л. Воробьев доказал, что при решении задач гидродинамической теории качки метод САР можно одинаково успешно применять для математических моделей "удлиненного" и "тонкого" судов. Этот факт отражает глубокую внутреннюю связь между двумя математическими моделями, основанную на предположении о линейности динамической системы «качающееся судно - взволнованная жидкость». Используя аналогию, он предложил для модели «удлиненного» судна новую процедуру сращивания решений внутренней и внешней задач на границе зон. Так, в рассмотренном примере реализован принятый зарубежными исследователями [86, 87, 89] стандартный прием сращивания решений на цилиндрической поверхности. Во внутренней зоне эта поверхность опирается на круг бесконечно большого радиуса, а во внешней – на круг бесконечно малого радиуса. Поэтому асимптотические разложения внешнего и внутреннего решений на границе зон должны быть представлены в полярных координатах. Получение таких представлений сложно даже для простейшего случая движения тела в безграничной жидкости [108]. Трудности серьезно возрастают при рассмотрении колебаний тела на свободной поверхности жидкости [109]. Отметим, что такой выбор граничной

поверхности не является обязательным, так как обоснования метода САР [83, 84, 85] не содержат каких-либо специальных требований к форме границы внутренней и внешней зон. Это подтверждается практикой применения метода САР в других разделах гидромеханики [110]. Процедура сращивания упрощается, если в качестве границы зон принять две вертикальные плоскости, параллельные оси X и простирающиеся во всей области, занятой жидкостью. Внешняя зона оказывается одинаковой для модели «тонкого» и «удлиненного» судов. В рассмотренной задаче она представляет собой пространство, в котором на плоскости $0xz$ нормальная производная потенциала терпит разрыв. Величина скачка производной в случае «тонкого» судна прямо следует из граничного условия на корпусе, и необходимость специального рассмотрения внутренней задачи не возникает. В случае «удлиненного» судна величина скачка производной определяется асимптотикой решения внутренней задачи на внешней границе внутренней зоны. Для иллюстрации предложенной процедуры сращивания покажем, как Ю.Л. Воробьев получил этим способом решение задачи (37)-(39) для «удлиненного» тела. В соответствии с (58) потенциал первого приближения во внешней зоне был представлен так:

$$\Phi_1(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma_1(\xi, \zeta) d\xi d\zeta}{[(x-\xi)^2 + y^2 + (z-\zeta)^2]^{3/2}}. \quad (74)$$

Величина скачка производной $\sigma_1(\xi, \zeta)$ определялась следующим образом. Из решения внутренней задачи, записанного во внешних переменных (52), было получено

$$\frac{\partial}{\partial y} \Phi_1(x, y, z) = \frac{a_1(x)}{2\pi} \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (75)$$

При $y \rightarrow \pm 0$ используя свойства δ -функции Дирака, было найдено

$$\frac{\partial}{\partial y} \Phi_1(x, \pm 0, z) = \pm \frac{a_1(x)}{2} \delta(z). \quad (76)$$

Учитывая свойства потенциала простого слоя [107], из (74) было получено

$$\frac{\partial}{\partial y} \Phi_1(x, \pm 0, z) = \pm \frac{1}{2} \sigma_1(x, z). \quad (77)$$

Сравнивая (76) и (77), было замечено, что

$$\sigma_1(x, z) = a_1(x) \delta(z). \quad (78)$$

Найденная плотность $\sigma_1(x, z)$ подставлялась в (74)

$$\Phi_1(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{a_1(\xi) d\xi}{[(x-\xi)^2 + y^2 + (z-\zeta)^2]^{3/2}}. \quad (79)$$

Здесь было учтено, что $a_1(x) \equiv 0$ при $|x| > L/2$. Этот результат полностью совпадает с формулой (55), полученной с помощью традиционного метода сращивания.

Отметим, что преимущества подхода Ю.Л. Воробьева к сращиванию внешнего и внутреннего решений особенно ощутимы в задачах, где учитывается влияние свободной поверхности и скорости хода. В приведенном выше примере с целью упрощения жидкость считалась безграничной. Решение внутренней задачи, полностью учитывающее ее волновой характер, получено в замкнутой аналитической форме. Форма решения практически снимает все трудности, которые так и не были преодолены другими исследователями [91, 93, 109, 111].

Следует отметить, что трудности получения решений гидродинамических задач о качке также объясняются повсеместным использованием для определения сил, действующих на судно, процедуры интегрирования гидродинамических давлений по смоченной поверхности корпуса, т.е. в области жидкости, где потенциал скоростей имеет особенно сложную структуру. Эта трудность имеет принципиальный характер, и для ее преодоления в работе применяется совершенно иной способ определения гидродинамических сил. Способ предусматривает использование выражений потенциала возмущенных скоростей жидкости на большом удалении от судна, т.е. в области, где они имеют самую простую структуру. Это намного уменьшает технические трудности вычисления гидродинамических сил и облегчает применение метода САР для решения краевой задачи.

Описанный подход к решению задач гидродинамической теории качки судна послужил основой докторской диссертации Ю.Л. Воробьева [106] и явился базисом для созданной им научной школы.

А.И.Лабиным под руководством Ю.Л. Воробьева был решен ряд задач о динамической посадке судна в различных условиях, в том числе и ледовых [112, 113, 114].

Разработанные Ю.Л. Воробьевым и его учениками рекомендации по определению запасов глубины под килем судна, движущегося на волнении по мелководному фарватеру, и ширины подходного канала составили научную и методическую основу «Норм технологического проектирования морских портов» $\frac{\text{ВНТП}-01-78}{\text{ММФ}}$ [118], «Методики назначения

объявленной осадки судна в морских портах» (утверждена НТС ММФ, протокол № 10 от 09.06.79), «Методики оперативного определения проходной осадки на водных подходах к морским портам» (утверждена НТС ММФ, протокол № 10 от 09.06.79).

Для обоснования ширины подходных каналов в работах Т.В. Смирновой [115, 116] и А.К.Чоудхури [117], выполненных под руководством Ю.Л. Воробьева решены задачи об обгоне и расхождении судов и поведении судна у бровки подходного канала

В работах выполненных совместно с О.Н. Крыловым [119, 120] показана эффективность предложенной модификации метода САР для определения поля возмущенных скоростей вблизи корпуса судна, что открыло новые перспективы использования этого метода (расчет поля скоростей в диске гребного винта, вычисление гидродинамической нагрузки, сил и моментов, действующих на корпус судна и др.).

С.Н. Баскаковым под руководством Ю.Л. Воробьева была разработана модификация метода САР – метод «склеивания» [121, 122, 123]. В этом методе граница внешней и внутренней зон фиксирована и является мысленным продолжением бортов судна. Эта модификация метода подтвердила эффективность асимптотических методов, в ее рамках для плоского случая удается выписать выражения для плоской задачи в замкнутом виде [124]. Результаты расчетов кинематических характеристик прямобортных понтонов, полученные с использованием полученных решений использованы в РД 31.13.02-89 «Правила морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов» [125].

Методы САР были применены Ю.Е. Дробышевским для решения гидромеханических задач об отыскании сил, действующих на судно при маневрировании на мелководье [126].

В работе А.Е. Нильва получила дальнейшее развитие техника применения метода сращиваемых асимптотических разложений (САР) в решении потенциальных гидродинамических задач на значительном мелководье; возмущающие силы волновой природы, действующих на корпус судна, были определены с учетом трехмерности обтекания корпуса [127]. Для этого была рассмотрена и решена методом САР гидродинамическая задача об определении потенциала скоростей дифрагированного волнового движения жидкости, образующегося при преломлении регулярных волн малой амплитуды на корпусе судна в условиях малого запаса глубины под килем судна [128], [129].

Н.В. Ефремова исследовала параметры качки малого судна при подходе к судну-партнеру на рейдовой стоянке. Для этого методами САР исследовалось существенно трехмерное волновое поле вокруг судна-партнера, образованное набегающим и дифрагированным волнением [130, 131, 132, 133].

Основные итоги научной деятельности Ю.Л. Воробьева сконцентрированы в монографии «Гидродинамика судна в стесненном фарватере» [134], получившей в 1994 году диплом первой степени Российского научно-технического общества инженеров кораблестроителей им. акад. А.Н. Крылова.

Тенденцией последних лет является увлечение численной гидромеханикой (методы конечных элементов, объемов и т.п.) и появлением некоторого пренебрежения аналитическими методами. Эта ситуация открывает новые перспективы для метода САР. Его использование позволяет объединить численные и аналитические методы: одной из проблемой численной судовой гидромеханики является бесконечность области опре-

деления потенциала. Между тем, развитие Ю. Л. Воробьевым асимптотические методы позволяют выписать выражения для потенциала на большом удалении от судна. Иначе говоря, применяя достаточно простые асимптотические решения, полученные аналитически, можно замкнуть область для численного решения. Это позволяет существенно повысить точность и время решения инженерных задач.

Осознавая описанную ситуацию, незадолго до кончины Ю.Л. Воробьев совместно с А.В. Демидюком подготовил учебное пособие «Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ» (~210 с.).

Выводы. Данная работа является первой попыткой осмысления и обобщения научной деятельности Ю.Л. Воробьева. В рамках одной статьи сделать это невозможно. На основании изложенного можно заключить, что Юрий Леонидович – ученый мирового уровня, а его творческое наследие является неотъемлемой частью мировой культуры. Ю.Л. Воробьевым создано новое направление морской гидродинамики. Это стало возможным благодаря главному итогу его деятельности – созданию собственной научной школы. Результаты его исследований востребованы практикой.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Теория поверхностных волн: Сб. переводов / Под ред. М.А. Красносельского, Н.Н. Моисеева. – М.: ИЛ, 1959. – 366 с.*
2. *Стокер Дж. Волны на воде. – М.: ИЛ, 1959. – 617 с.*
3. *Костюков А.А. Теория корабельных волн и волнового сопротивления. – Л.: Судпромгиз, 1959. – 311 с.*
4. *Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля. – Л.: Судостроение, 1966. – 235 с.*
5. *Сизов В.Г. К теории волнового сопротивления судна на тихой воде // Известия АН СССР, ОТН: Механика и машиностроение. – 1961. – № 1. – С.75-85.*
6. *Сизов В.Г., Степанов В.В. Краевая задача для потенциала скоростей самоходного судна. – В кн.: Судостроение и судоремонт. – Вып.1: Сб.науч.тр. – Одесса: ОИИМФ, 1967. – С.19-29.*
7. *Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. – М.: Наука, 1977. – 816 с.*
8. *Моисеев Н.Н. О математических методах исследования нелинейных колебаний жидкости. – В кн.: Труды Международного симпозиума по нелинейным колебаниям. – Т.3. – К.: Издательство АН УССР, 1963. С.275-286.*
9. *John F. On the motion of floating bodies I // Comm. Pure Appl. Math. – 1949. – Vol.2. – P.13-57.*
10. *John F. On the motion of floating bodies II // Comm. Pure Appl. Math. – 1950. – Vol.3. – P.45-101.*

11. Peters A.S., Stoker J.J. *The motion of a ship, as a floating rigid body, in a seaway* // *Comm. Pure Appl. Math.* – 1957. – Vol.2. – P.399-490.
12. Newman J.N. *The damping and wave resistance of a pitching and heaving ship* // *Journal of Ship Research.* – 1959. – Vol.3. – № 1. – P.1-19.
13. Newman J.N. *A linearized theory for the motion of a thin ship in regular waves* // *Journal of Ship Research.* – 1961. – Vol.5. – № 1. – P.34-55.
14. Луговский В.В. *Исследование гидродинамики продольной качки конечной амплитуды на ходу.* – В кн.: *Мореходные качества судов.* – Вып.119 // *Сб.науч.тр. ЦНИИМФ.* – Л.: *Транспорт,* 1969. – С.3-16.
15. Луговский В.В. *Гидродинамика нелинейной качки судов.* – Л.: *Судостроение,* 1980. – 255 с.
16. LSE C.M. *The second-order theory of heaving cylinders in a free surface* // *Journal of Ship Research.* – 1968. – Vol.12. – № 4. – P.313-327.
17. Potash R.L. *Second-order theory of oscillating cylinders* // *Journal of Ship Research.* – 1971. – Vol.15. – № 4. – P.295-324.
18. Басин А.М. *Качка судов.* – М.-Л.: *Транспорт,* 1969. – 272 с.
19. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. *Качка судов на морском волнении.* – Л.: *Судостроение,* 1969. – 432 с.
20. Хаскинд М.Д. *Гидродинамическая теория качки корабля.* – М.: *Наука,* 1973. – 327 с.
21. Ogilvie T.F. *Recent progress toward the understanding and prediction of ship motions.* – *Eroo.Symp.Nav. Hydrodyn., 5-th ACR-112, Off.Nav.Res. – Washington, D.C.,* 1964. – P.3-80.
22. Tasai P. *The "State of art" of calculations for lateral motions.* – *13th ITTC, Berporfc of Seakeeping Committee, Proceedings, Hamburg-Berlin,* 1972. – Vol.2. – P.918-942.
23. Ремез Ю.В. *Продольная качка судов.* – Дис. ... докт. техн. наук. – Николаев, 1967. – 361 с.
24. Newman J.N. *Interaction of waves with two-dimensional obstacles: a relation between the radiation and scattering problem* // *Journal of Fluid Mechanics.* – 1975. – Vol.71. – Part 2. – P.273-282.
25. Newman J.N. *The theory of ship motions* // *Advances in Applied Mechanics.* – 1978. – Vol.18. – P.221-283.
26. Newman J.N. *The damping of an oscillating ellipsoid near a free surface* // *Journal of Ship Research.* – 1961. – Vol.5. – № 3. – P.44-58.
27. Newman J.N. *The exciting forces on a moving body in waves* // *Journal of Ship Research.* – 1965. – Vol.9. – № 3. – P.190-199.
28. Havelock T.H. *The coupling of heave and pitch due to speed of advance.* – *TINA,* 1955. – P.246-251.

29. Timman R., Newman J.N. *The coupled damping coefficients of a symmetric ship* // *Journal of Ship Research*. – 1962. – Vol.5. – № 4. – P.1-7.
30. Michell J.H. *The wave resistance of a ship* // *Philosophical Magazine*. – 1898. – Ser.5. – Vol.45. – № 272. – P.106-123.
31. Самарский А.А. *Введение в теорию разностных схем*. – М.: Наука, 1971. – 552 с.
32. Самарский А.А., Николаев Е.С. *Методы решения сеточных уравнений*. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
33. Семенов-Тянь-Шанский В.В., Благовещенский С.Н., Холодильник А.Н. *Качка корабля*. – Л.: Судостроение, 1969. – 392 с.
34. Коннор Дж., Бреббиа К. *Метод конечных элементов в механике жидкости*. – Л.: Судостроение, 1979. – 264 с.
35. Сьярле Ф. *Метод конечных элементов для эллиптических задач*. – М.: Мир, 1980. – 512 с.
36. Кочин Н.Е. *Плоская задача об установившихся колебаниях тел под свободной поверхностью тяжелой несжимаемой жидкости* // *Известия АН СССР, ОТН*. – 1935. – Вып.4. – С.37-62.
37. Хаскинд М.Д. *Плоская задача об установившихся колебаниях крыла под поверхностью тяжелой аддокси конечной глубины* // *Известия АН СССР, ОТН*. – 1942. – № 11-12. – С. 66-86.
38. Хаскинд М.Д. *Плоская задача о колебаниях тела под поверхностью тяжелой жидкости конечной глубины* // *Известия АН СССР*. – 1944. – Т.VIII. – Вып.4. – С.287-300.
39. Хаскинд М.Д. *Колебания плавающего контура на поверхности тяжелой жидкости* // *Известия АН СССР, ПММ*. – 1953. – Т.XIII. – Вып.2. – С.165-178.
40. Ursell F. *On the heaving motion of the circular cylinder on the surface of a fluid* // *Quarterly Journal for Mechanics and Applied Mathematics*. – 1949. – Vol.2. – P.218-231.
41. Басин А.М., Веледницкий И.О., Ляховицкий А.Г. *Гидродинамика судов на мелководье*. – Л.: Судостроение, 1976. – 320 с.
42. Newman J.N. *The exciting forces on fixed bodies in waves* // *Journal of Ship Research*. – 1962. – Vol.6. – № 3. – P.10-17.
43. Мазур В.Ю. *О методе решения плоских волновых задач идеальной жидкости для односвязных областей* // *Прикладная механика АН УССР*. – 1973. – Т.IX. – Вып.4. – С.108-116.
44. Фильчаков Д.Ф. *Приближенные методы конформных отображений*. – К.: Наукова думка, 1964. – 531 с.
45. Фильчаков П.Ф. *Численные и графические методы прикладной математики*. – К.: Наукова думка, 1970. – 800 с.

46. Салькаев А.З. *Расчёт гидродинамических сил, действующих на контур произвольной формы, и уравнение бортовой качки.* – В кн.: *Труды ЦНИИ им. акад.А.Н. Крылова.* – Вып.235. – Л., 1967. – С.26-79.
47. Салькаев А.З. *Расчет гидродинамических сил, действующих на регулярном волнении на суда с большим отношением ширины к осадке* // *Судостроение.* – 1980. –№ 4. – С.19-21.
48. Hwang J.N. *Added mass of two-dimensional cylinders with, the sections of straight frames oscillating vertically in a free surface* // *International Shipbuilding Progress.* – 1969. – Vol.16. – № 178. – P.169-181.
49. Войценья В.С. *Плоская задача о колебаниях тела под поверхностью раздела двух жидкостей* // *Известия АН СССР, ПММ.* – 1958. – Т.XXII. – Вып.6. – С.789-803.
50. Воробьев Ю.Л., Коханов Э.В. *Гидродинамические силы, действующие на плоский контур в двухфазной жидкости конечной глубины.* – В кн.: *Теория корабля и гидромеханика.* – Вып.74: Сб. науч.тр. – Николаев: НКИ, 1973. – С. 65-70.
51. Гулиев Ю.М. *Приближенный способ определения гидродинамических характеристик при колебаниях плоского контура.* – В кн.: *Судостроение и судоремонт.* – Вып.IV: Сб.науч.тр., Одесса: ОИИМФ, 1970. – С.34-43.
52. Коханов Э.В. *Колебания контура, плавающего на поверхности жидкости конечной глубины с внутренней поверхностью раздела плотности.* – В кн.: *Судостроение и судоремонт.* – Вып.VI: Сб. науч. тр. ОИИМФ. – М.: Рекламинформбюро ММФ, 1975. – С.38-43.
53. Коханов Э.В. *О расчетах гидродинамических характеристик качки контуров на мелководье.* – В кн.: *Судостроение и судоремонт.* – Вып.VIII: Сб. науч. тр. ОИИМФ. – М.: Рекламинформбюро. – М., 1977. – С.28-33.
54. Коханов Э.В. *Гидродинамические характеристики качки судовых контуров в одно- и двухслойной жидкости ограниченной глубины: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* – Николаев, 1978. – 23 с.
55. Элис Я.М. *Гидродинамические давления, присоединенные массы и коэффициенты демпфирования при продольной качке судна с креном.* – В кн.: *Судостроение и судоремонт.* – Вып.1: Сб. науч.тр. ОИИМФ. – Одесса, 1967. – С.29-38.
56. Grim O. *A method for a more precise computation of heaving and pitching motions both in smooth water and in waves.* – *Third Symposium on Naval Hydrodynamics, September 19-22, Scheveningen, Netherlands.* – 1960. – P.483-524.

57. Kim C.H. *The influence of water depth on the heaving and pitching motions of a ship moving in longitudinal regular head waves* // *Schiffstechnik*. – 1968. – Bd. 15. – H. 79. – S.127-132.
58. Kim C.H. *Hydrodynamic forces and moments for heaving, swaying and rolling cylinders on water of finite depth* // *Journal of Ship Research*. – 1969. – Vol.13. – № 2. – P.137-154, 167.
59. Porter W.R. *Pressure distributions, added mass, and damping coefficients for cylinders oscillating in a free surface*. – *University of California, IER Report Series*. – № 82. – Issue 16. – July 1960. – 213 p.
60. Porter W.B. *Added mass, damping, and wave-ratio coefficients for heaving shiplike cylinders* // *Journal of Ship Research*. – 1966. – Vol.10. – № 4. – P.222-241.
61. Soding H. *Second-order forces on oscillating cylinders in waves* // *Schiffstechnik*. – 1976. – Bd.23. – Ht. 114. – S.205-209.
62. Takaki M. *On the hydrodynamic forces and moments acting on the two-dimensional bodies oscillating in shallow water* // *Reports of Research Inst. for Appl.Mech.* – 1977. – Vol.XXIV. – № 78. – P.1-64.
63. Tasai F. *On the damping force and added mass of ships heaving and pitching* // *Reports of Research Inst. For Appl.Mech.* – 1959. – Vol.VII. – № 26. – P.131-152.
64. Tasai F. *Damping force and added mass of ships heaving and pitching (continued)* // *Reports of Research Inst. for Appl.Mech.* – 1960. – Vol.VIII. – № 31. – P.39-69.
65. Thorne P.C. *Multipole expansions in the theory of surface waves* // *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. – 1955. – Vol.49. – Part 4. – P.707-716.
66. Wahab B., Vink J.N. *Wave induced motions and loads on ships in oblique waves* // *International Shipbuilding Progress*. – 1975. – Vol.22. – № 249. – P.151-184.
67. Honkanen M. *The wave induced motions of ships* // *Med. Swen.Tekn. Vetenskapsakad., Finland (The Swedish Academy of Engineering Sciences in Finland)*. – Report № 30. – 1976. – P.1-159.
68. Воробьев Ю.Л. *О вычислении волнового сопротивления судна* // *Инженерный журнал АН СССР*. – 1965. – Т.7. – Вып.6. – С.1109-1111.
69. Воробьев Ю.Л. *Аналитическое исследование и способы расчета волнового сопротивления судов при движении на глубокой воде и мелководье: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса, 1966. – 19 с.*

70. Воробьев Ю.Л. Способ расчета интеграла волнового сопротивления судна, движущегося на глубокой воде и мелководье // Известия АН АзССР. – Серия физико-технических и математических наук. – 1965. – № 6. – С.39-45.
71. Воробьев Ю.Л. Об одной особенности интеграла волнового сопротивления. – В кн.: Судостроение и морские сооружения. – Вып.2: Сб.науч.тр. ХГУ. – Харьков, 1966. – С.15-19.
72. Воробьев Ю.Л. Практический расчет волнового сопротивления судна с помощью ЭЦВМ. – В кн.: Судостроение и судоремонт. – Вып.1: Сб. науч.тр. ОИИМФ. – Одесса, 1967. – С.11-19.
73. Воробьев Ю.Л., Митцих Н.Н. Потенциал скоростей жидкости при движении тонкого судна по сложной траектории. – Вкн.: Судостроение и морские сооружения. – Вып.19: Сб.науч.тр. ХГУ. – Харьков, 1972. С.83-95.
74. Gerritsma J., Kerwin J.B., Newman J.N. Polynomial representation and damping of series 60 hull forms // International Shipbuilding Progress. – 1962. – Vol.9. – № 95. – P. 295-304.
75. Анкудинов В.К., Качка судна на спокойной воде в условиях мелководья. – В кн.: Доклады к XV научно-технической конференции по теории корабля и гидромеханике судна (Крыловские чтения). – Вып.64. – НТО СП. – Л., 1965. – С.121-128.
76. Анкудинов В.К. Движение судна на волнении в условиях мелководья. – В кн.: Доклады к XVI научно-технической конференции по теории корабля (Крыловские чтения). – Вып.73. – НТО СП. – Л., 1966. – С.192-197.
77. Ремез Ю.В. Краевая задача гидродинамической теории качки судна типа Митчела при конечной глубине жидкости. – В кн.: Доклады к XVI научно-технической конференции по теории корабля (Крыловские чтения). Вып.73. – НТО СП. – Л., 1966. – С.176-182.
78. Takaki M., Ganno M. A calculation of finite depth effect on ship motions in waves // Journal Zosen Kyokai. – 1967. – Vol.122. – P.10-17.
79. Степанов В.А. Возмущающие силы при качке судна на косом волнении. – В кн.: Теория корабля. – Вып.38: Сб.науч. тр. НКИ. – Николаев, 1970. – С.107-116.
80. Степанов В.А. Гидродинамика продольной качки судна в жидкости переменной глубины. – В кн.: Теория корабля, виш.38: Сб. науч.тр. НКИ. – Николаев, 1970. – С.117-125.
81. Дыхта Л.М. Исследование гидродинамических характеристик качки судна типа Митчела. – В кн.: Теория корабля. – Вып.35: Сб. науч.тр. НКИ. – Николаев, 1970. – С.40-50.
82. Эшли Х., Лэндал М. Аэродинамика крыльев и корпусов летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1969. – 318 с.

83. Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкости. – М.: Мир, 1967. – 310 с.
84. Коул Дж. Методы возмущений в прикладной математике. – М.: Мир, 1972. – 274 с.
85. Найфэ А. Методы возмущений. – М.: Мир, 1976. – 455 с.
86. Ursell F. Slender oscillating-ships at zero forward speed // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1962. – Vol.14. – № 4. – P. 496-516.
87. Tuck E.O. A systematic asymptotic expansion procedure for slender ships // *Journal of Ship Research*. – 1964. – Vol.8. – № 1. – Part 1. – P.15-23.
88. Joosen W.P.A. Slender body theory for an oscillating ship at forward speed. – *Proc. Fifth Symp. Naval hydrodyn.* – Bergen, 1964. – P.167-183.
89. Newman J.N., Tuck E.O. Current progress in the slender-body theory for ship motions. – *Proc. Symp. Nav. Hydrodyn., 5-th ACR-112, Off. Nav. Bes.* – Washington, D.C., 1964. – P.129-166.
90. Newman J.N. Applications of slender-body theory in ship hydrodynamics // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1970. – Vol.2. – P.67-94.
91. Maruo H., Tokura J. Prediction of hydrodynamic forces and moments acting on ships in heaving and pitching oscillations by means of an improvement of the slender ship theory // *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. – 1978. – Vol.143. – P.104-112.
92. Motoshima B. The wave pattern and exciting forces of a slender body // *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. – 1978. – Vol.143. – P.26-33.
93. Troesch A.W. The diffraction forces for a ship moving in oblique seas // *Journal of Ship Research*. – 1979. – Vol.23. – № 2. – P.127-139.
94. Beck R.F., Troesch A.W. Wave diffraction effects in head seas // *International Shipbuilding Progress*. – 1980. – Vol.27. – № 316. – P.406-415.
95. Tuck E.O. Ship motions in shallow water // *Journal of Ship Research*. – 1970. – Vol.14. – № 4. – P.317-328.
96. Воробьев Ю.Л., Весловский Р.К. О движении судна на значительном мелководье. – В кн.: Судостроение и судоремонт. – Вып.71: Сб. науч. тр. ОИИМФ. – М.: Рекламинформбюро ММФ, 1975. – С.9-16.
97. Весоловский Р.К. Исследование продольной качки судна на значительном мелководье: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Одесса, 1975. – 24 с.

98. Воробьев Ю.Л. О потенциале возмущенных скоростей жидкости при движении судна на встречном волнении по мелководью. – В кн.: Судостроение: Республиканский межведомственный науч.-техн. сб. – Вып.25. – Киев-Одесса: Вища школа, 1976. – С.53-55.
99. Plotkin A. Heave and pitch motions'in shallow water including the effect of forward speed // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1977. – Vol.80. – Part 3. – P. 433-441.
100. Plotkin A. Transcritical heave and pitch motions in shallow water // *Journal of Ship Research*. – 1980. – Vol.24. – № 1. – P.45-49.
101. Beck R.F., Newman J.N., Tuck E.O. Hydrodynamic forces on ships in dredged channels // *Journal of Ship Research*. – 1975. – Vol.19. – No 2. – P.166-171.
102. Newman J.N. Lateral motion of a slender body between two parallel walls // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1969. – Vol.59. – Part 1. – P. 97-115.
103. Воробьев Ю.Л., Лабин А.И. Определение динамической посадки судов на мелководье. – В кн.: Тезисы докладов на Всесоюзной научно-технической конференции по проблемам повышения ходкости и мореходности судов и плавучих технических средств в условиях волнения моря (Крыловские чтения). – Л.: Судостроение, 1980. – С. 23-24.
104. Plotkin A. Flow past an anchored slender ship in variable-depth shallow water: an extension // *Journal of Hydronautics*. – 1976. – Vol.10. – № 1. – P. 28-30.
105. Plotkin A. The flow due to a slender ship moving over a wavy wall in shallow water // *Journal of Engineering Mathematics*. – 1976. – Vol.10. – № 3. – P. 207-218.
106. Воробьев Ю.Л. Асимптотическая теория качки судна. – Дис. ... докт. техн. наук. – Одесса, 1982. – 427 с.
107. Петровский И.Г. Лекции об уравнениях с частными производными. – 3-е изд. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 400 с.
108. Ogilvie T.F. Singular-perturbation problems in ship hydrodynamics // *Advances in Applied Mechanics*. – 1977. – Vol.17. – P. 91-188.
109. Maruo H. An improvement of the slender body theory for oscillating ships with zero forward speed // *Bulletin of the Faculty of Engineering*. – Yokohama National University. – March 1970. – Vol.19. – P.45-56.
110. Рождественский К.В. Метод сращиваемых асимптотических разложений в гидродинамике крыла. – Л.: Судостроение, 1979. – 208 с.

111. *Motora S. Stripwise calculation of hydrodynamic forces due to beam seas // Journal of Ship Research. – 1964. – Vol.8. – № 1. – Part 1. – P. 1-9.*
112. Воробьев Ю.Л., Лабин А.И. Задача о динамической посадке судна при движении по мелководному фарватеру, покрытому льдом // НТС «Вопросы судостроения и судоремонта». – М.: В/О «Мортехреклама», 1983.
113. Воробьев Ю.Л., Соколов В.Г., Журавицкий Г.Д., Коханов Э.В., Кубачев Н.А., Лабин А.И. К вопросу о навигационных запасах глубин под килем судна при плавании в каналах и на мелководье // Морской транспорт, серия «Судовождение и связь» ЭИ. – Вып. 9(194). – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1986. – С. 1-18.
114. Воробьев Ю.Л., Чоудхури А.К. Поперечная сила и момент рыскания при движении судна с дрейфом на значительном мелководье. Депонир. В/О «Мортехинформреклама». – № 378 МФ-Д84 от 19.11.84 г.
115. Воробьев Ю.Л., Смирнова Т.В. Об оценке гидродинамического взаимодействия судов, расходящихся на мелководье // НТС «Теория и практика судостроения и судоремонта». – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1986. – С. 33-38.
116. Воробьев Ю.Л., Смирнова Т.В. Влияние мелководья на характеристики гидродинамического взаимодействия судов, расходящихся параллельными курсами // НТС «Актуальные проблемы судостроения и судоремонта». – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1987. – С. 64-68.
117. Воробьев Ю.Л., Чоудхури А.К. Гидродинамическая задача о движении судна на мелководье у бровки подходного канала. Депонир. В/О «Мортехинформреклама». – № 378 МФ-Д84 от 19.11.84 г.
118. Воробьев Ю.Л., Таран В.М., Булихман И.С., Мирошниченко В.Г., Соколов В.Т., Журавицкий Г.Д., Никеров П.С., Коханов Э.В. Нормы проектирования морских каналов. – М.: В/О «Мортехинформреклама». – РД 31.31. 47-88. – 1988. – С. 50.
119. Воробьев Ю.Л., Крылов О.Н. Пульсирующие составляющие скорости в диске движителя при качке судна на тихой воде // НТС «Перспективные типы судов и их мореходные качества». – Л.: Транспорт, 1983.
120. Воробьев Ю.Л., Крылов О.Н., Литис В.Б. Определение поля скоростей в диске гребного винта при качке. – В кн.: Средства и методы улучшения ходкости и мореходности судов: Тезисы докладов на Всесоюзной научно-технической конференции (Крыловские чтения). – Л.: Судостроение, 1981. – С.35-36.

121. Баскаков С.Н., Воробьев Ю.Л., Турлак А.А. Метод решения гидродинамических задач для плавучих объектов с вертикальными бортами. Физико-математическое моделирование при решении проблем гидродинамики и динамики судов и средств освоения океана (XXXIV Крыловские чтения 1989 г.): Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Л.: Судостроение, 1989. – С. 99-100.
122. Воробьев Ю.Л. Баскаков С.Н. Гидродинамическая задача о вертикальной и килевой качке прямоугольного понтона с малой осадкой. XXI Югославский конгресс по теоретической и прикладной механике. – Ниш, 1995. С.56-60, 123.
123. Баскаков С.Н., Воробьев Ю.Л., Давыдов И.Ф. Гидродинамические задачи о качке прямобортных понтонов // Вісник Одеського національного морського університету. – № 8. – 2001. С.8-23.
124. Баскаков С.Н., Воробьев Ю.Л. Приближенное решение задачи излучения для прямоугольного шпангоута на глубокой воде // Судостроение и судоремонт: Сб. ОИИМФ. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1989. – С.5-9.
125. Афанасенко А.В., Баскаков С.Н., Воробьев Ю.Л. и др. РД 31.13.02.-89 «Правила морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов». – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1990. – 40 с.
126. Воробьев Ю.Л., Дробышевский Ю.Е., Коханов Э.В. Имитационная модель маневрирования судна в сложных навигационных условиях // Методы прогнозирования и способы повышения мореходных качеств судов и средств освоения океана (XXXV Крыловские чтения 1991 г.): Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Л.: Судостроение, 1991.
127. Vorobyov Y., Nilva A. Wave loads on a grounded vessel // Proceedings of the 6th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles. – 22-27 September. – 1997. – Varna, Bulgaria. – Vol. II. – P. 223-230.
128. Нильва А.Е. Возмущающие поперечно-горизонтальные силы и момент рыскания на значительном мелководье и мели // Вісник Одеського державного морського університету. – Одеса, 1998. – № 1. – С. 94-100.
129. Нильва А.Е. Определение волновой вертикальной гидродинамической нагрузки на судно, которое находится на значительном мелководье // Вісник Одеського державного морського університету. – Одеса, 2000. – № 5. – С. 37-42.
130. Ефремова Н.В. Гидродинамическая задача о дифракции волнения, набегающего на судно в мелководной акватории // Вісник ОДМУ. – Одеса, 1998. – № 1. – С. 80-85.

131. Ефремова Н.В. *Определение возмущающих сил, действующих на малый плавучий объект вблизи большого судна на рейдовой стоянке* // Вісник ОДМУ. – Одеса, 1999. – № 3. – С. 39-47.
132. Ефремова Н.В. *Расчет характеристик качки малого плавучего объекта на морском волнении вблизи крупнотоннажного судна* // Вісник ОДМУ. – Одеса, 2000. – № 5. – С. 29-36.
133. Ефремова Н.В. *Определение продольно-горизонтальных перемещений малого судна, пришвартованного к судну – партнеру на рейдовой стоянке* // Вісник ОНМУ. – № 11. – 2003. – С. 67-77.
134. Воробьев Ю.Л. *Гидродинамика судна в стесненном фарватере*. – СПб.: Судостроение, 1992. – 224 с.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 629.5.015.4

В.В. Аврамов, А.В. Печенюк

**РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ГРЕБНОГО ВИНТА СОВРЕМЕННЫМИ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ**

Разработана методика решения задачи определения напряженно-деформированного состояния гребных винтов. Решена проблема получения и приложения внешних сил при анализе прочности конструкций, находящихся под действием гидродинамической нагрузки. Сделаны выводы о возможностях современных вычислительных методов в решении сложных сопряженных задач.

Ключевые слова: гидроупругая задача, метод конечных элементов, метод конечных объемов.

Розроблена методика рішення задачі визначення напружено-деформованого стану гребних гвинтів. Вирішена проблема здобуття і додатка зовнішніх сил при аналізі міцності конструкцій, що знаходяться під дією гідродинамічного навантаження. Зроблені висновки про можливість сучасних обчислювальних методів у вирішенні складних зв'язаних завдань.

Ключові слова: гідроупруге завдання, метод кінцевих елементів, метод кінцевих об'ємів.

Propeller stress-strain condition determination method is developed. The problem of estimation and application of external forces is solved for the hydrodynamic load in structural design. In conclusion, modern calculation methods are described for dual problem.

Keywords: hydroelastic problem, finite element method, finite volume method.

Постановка проблемы. Прочность является одним из важных качеств судового гребного винта. Потеря прочности гребного винта может послужить причиной аварии судна или, по крайней мере, ухудшения его ходкости. С точки зрения прочности, наиболее уязвимой частью гребного винта любого типа, является его лопасть. Лопасть гребного винта фиксированного шага представляет собой геликоидальную оболочку переменной толщины и кривизны, жестко закрепленную на ступице. В процессе эксплуатации судна лопасть гребного винта находится под воздействием внешних сил гидродинамической и инерционной природы, а также сил тяжести, влияние которых пренебрежимо мало. На судах, эксплуатирующихся в ледовых условиях, лопасти гребных винтов также взаимодействуют со льдом, что учитывать при их проектировании.

Целью данной статьи является детальное освещение вопросов, связанных с методикой подготовки и решения гидроупругой задачи обтекания лопастей гребного винта с применением численных методов гидродинамики для моделирования потока жидкости и метода конечных элементов для прочностного анализа лопастей.

В настоящее время существует два основных подхода к расчету прочности лопастей гребного винта. Первый метод представляет собой метод расчета общей прочности по балочной теории, в его основе лежит допущение о том, что лопасть может быть представлена в виде заделанного на конце консольного прямого стержня с переменной площадью поперечных сечений, подверженного криволинейной деформации от действия внешних сил. Напряжения материала лопасти определяются для цилиндрических сечений, спрямленных на плоскость, в предположении, что главная центральная ось инерции, относительно которой момент инерции минимальный, параллельна хорде сечения. Этот подход впервые был предложен Тейлором в 20-х годах XX века и затем постоянно совершенствовался. Преимуществом данного подхода является сравнительная простота его использования. Недостатком балочной модели является игнорирование протяженности лопасти и распределения нагрузки вдоль хорды сечения, что вызывает такое напряженное состояние материала лопасти, которое не может быть корректно учтено теорией изгиба балок и имеет ряд особенностей. Лопасть подвержена действию скручивающих моментов, обусловленных жесткой заделкой в ступице и неравномерностью нагрузки по хорде. В результате она находится в условиях стесненного кручения, действие которого из-за малости размаха лопасти распространяется на все ее сечения. Кроме того, неравномерность нагрузки и толщины сечения вдоль хорды приводит к такому распределению деформаций и напряжений в лопасти, при котором их максимальные значения не всегда наблюдаются в точках, лежащих у середины хорды, относительно которых выполняется расчет по балочной модели, а смещаются к выходящей кромке. Наиболее заметно эти особенности напряженно-деформированного состояния проявляются в случае применения контура лопасти со значительной саблевидностью и откидкой, при больших дисковых отношениях, что характерно для гребных винтов с конца 70-х годов XX века. В настоящее время установлено, что балочная модель дает удовлетворительные результаты для узколопастных движителей с традиционной профилировкой лопастей.

Второй подход к расчету прочности лопастей гребных винтов основывается на теории тонких пластин или оболочек либо методе конечных элементов (МКЭ). Этот подход позволяет определить напряжение в любой точке лопасти и, получив название, метода расчета местной прочности. При использовании МКЭ для решения задач о напряженно-деформированном состоянии (НДС) тел, последние представляются в виде совокупности конечных элементов, связанных между собой в узловых точках. Использованный авторами комплекс программ [3],

реализует МКЭ в варианте метода перемещений, то есть за основные неизвестные принимаются компоненты перемещений узловых точек. При этом НДС i -го элемента однозначно определяется через его узловые перемещения $\{q\}^{(i)} = \{q_1, q_2, \dots, q_r\}^{(i)}$. Связь между конечными элементами, вызывает в узловых точках реактивные усилия взаимодействия, и каждый из конечных элементов, оказывается загруженным этими усилиями $\{R\}^{(i)} = \{R_1, R_2, \dots, R_r\}^{(i)}$. Вектор усилий $\{R\}^{(i)}$ также однозначно определяет НДС элемента. В настоящее время МКЭ достаточно широко используется в решении задач строительной механики [2].

Для того чтобы обеспечить высокую точность результатов расчета местной прочности лопасти с помощью МКЭ, необходимо корректно задать внешние силы: распределение сил инерционной (центробежной) природы по объему лопасти и сил гидродинамической природы по ее поверхности. В простейшем случае равномерного вращения винта в однородном потоке центробежная сила может быть легко рассчитана для каждого КЭ в зависимости от его положения относительно оси вращения и массы. Получение гидродинамических сил на поверхности лопасти представляет собой гораздо более сложную задачу, для решения которой необходимо смоделировать поток, обтекающий лопасть.

Для моделирования потока, обтекающего лопасть гребного винта в свободной воде, могут быть использованы методы вычислительной гидродинамики (ВГД). Методы ВГД базируются на уравнениях модели несжимаемой жидкости:

1. Уравнение Навье-Стокса с учетом турбулентной вязкости в форме, предложенной Рейнольдсом

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(V \otimes V) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left((\mu + \mu_t) (\nabla V + (\nabla V)^T) \right),$$

где V – скорость;

t – время;

P – давление;

ρ – плотность;

μ – молекулярная вязкость;

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon}$$

– выражение для турбулентной динамической вязкости в рамках стандартной κ - ε модели турбулентности;

κ – турбулентная энергия, определяется из уравнения

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \nabla(V\kappa) = \frac{1}{\rho} \nabla \left((\mu + \mu_t) \nabla \kappa \right) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{ini});$$

ε – параметр диссипации турбулентной энергии, определяется из уравнения

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(V\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \mu_t)\nabla\varepsilon) + \frac{\varepsilon}{\kappa} \left(C_1 \frac{G}{\rho} - C_2(\varepsilon - \varepsilon_{ini}) \right);$$

ε_{ini} – начальное значение параметра (скорости) диссипации турбулентной энергии;

$$G = (\mu + \mu_t) \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right);$$

$C_\mu = 0,09$, $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$ – эмпирические параметры модели.

2. Уравнение неразрывности $\nabla V = 0$.

Для моделирования работы винта в свободной воде необходимо обращение потока по поступательному движению и по вращению – путем вращения абсолютной системы координат (жидкость вращается как твердое тело). Во вращающейся системе координат силы инерции жидкости (Кориолиса и центробежная) имеют вид

$$B = -2\omega \times V - \omega \times \omega \times r,$$

где B – сила инерции;

ω – угловая скорость рассматриваемой точки потока;

r – радиус вращения рассматриваемой точки потока.

Расчетная область представляет собой цилиндр, соосный с аналитической моделью винта. Размеры цилиндра выбирают таким образом, чтобы избежать влияния ограниченности потока на исследуемые гидродинамические характеристики. Общая схема расстановки граничных условий (ГУ) в расчетной области с моделью винта представлена на рис.1. В расчетах используется прямоугольная адаптивная локально измельченная сетка (АЛИС).

Относительную поступь удобно задавать изменением скорости поступательного движения при постоянном числе оборотов, что позволяет обеспечить изменения числа Rn в относительно небольших пределах.

В качестве объекта исследования рассмотрен гребной винт, спроектированный в Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering (KRISO) для перспективного контейнеровоза.

Основные геометрические характеристики гребного винта и его модели приведены в табл. 1.

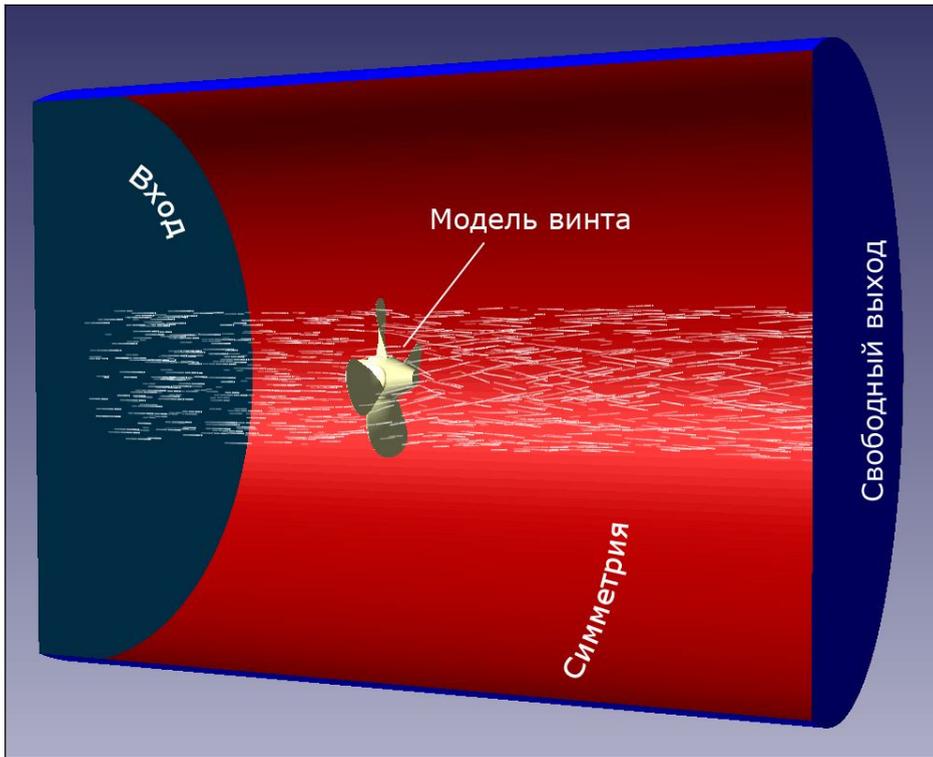


Рис.1. Расчетная область с ГУ и моделью винта

Таблица 1

Характеристики гребного винта и его модели

	Натура	Модель
Диаметр D , м	7,900	0,250
Шаг P , м	7,505	0,238
Шаговое отношение P/D	0,950	
Дисковое отношение A_E/A_O	0,800	
Число лопастей z	5	
Масштаб	31,5994 : 1	

В KRISO также были выполнены модельные испытания винта и получены его гидродинамические характеристики, опубликованные в [1]. Эти данные использованы для тестирования результатов численного моделирования. Кривые действия, полученные численным путем, показаны в сравнении с результатами модельного эксперимента на рис.2.

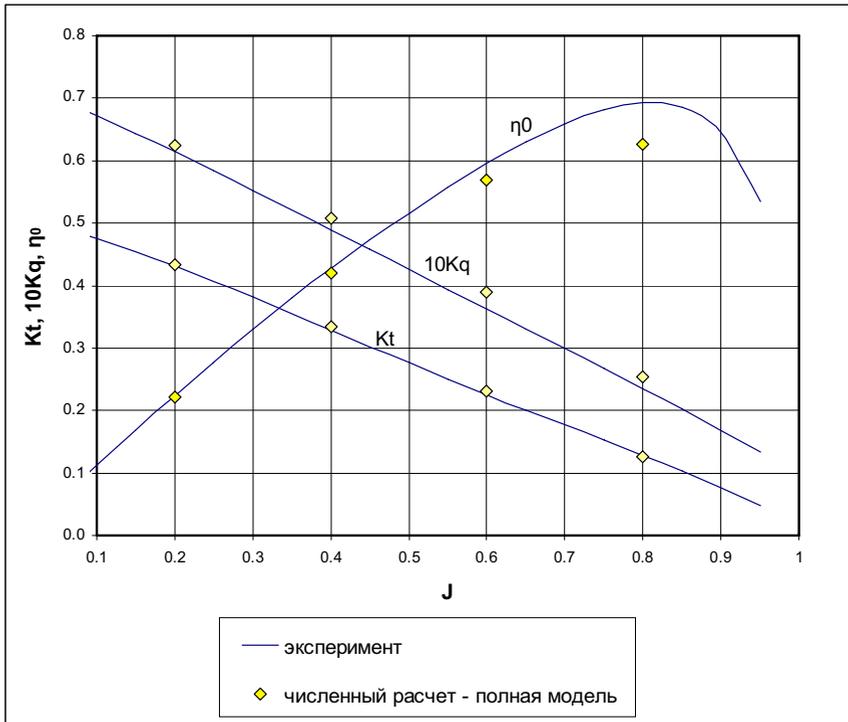


Рис.2. Кривые действия по данным эксперимента и расчетов

Распределение внешних сил – нормальных и касательных напряжений в жидкости – по поверхности лопасти винта по результатам численного моделирования при относительной поступи $J = 0,6$ показано на рис.4. Шкалы напряжений представлены в относительном виде. Нормальные напряжения (давления) отнесены к упору на единицу площади диска

$\frac{T}{\pi \cdot D^2}$. Касательные напряжения отнесены к выражению, содержащему момент

$\frac{Q}{0,7 \cdot \pi \cdot D^3}$.

Результаты расчета гидродинамических нагрузок, действующих на каждый i -й элемент КЭ модели, экспортировались в промежуточный файл, содержащий номер КЭ и величину нагрузки. Чтение данных из файла выполнялось с помощью макроса, разработанного на основе встроенного в Ansys параметрического языка программирования APDL. APDL является языком написания командных сценариев, который может использоваться для автоматизации часто решаемых задач или построения моделей на основе переменных, а также охватывает широкий диапазон других возможностей, например, таких, как повторение команд, вызов

макросов, применение логических ветвлений, циклов, а также операций со скалярными данными, векторами и матрицами.

Из рис.2 видно, что в целом (на уровне интегральных гидродинамических характеристик), несмотря на некоторые неточности, численные расчеты позволяют достаточно адекватно моделировать работу гребного винта. Это позволяет предположить, что использование распределения давлений по поверхности лопасти, полученное численно, является вполне обоснованным в прочностном анализе винта. Отметим, что получение аналогичных данных из модельного эксперимента требует очень сложной и дорогостоящей его постановки.

На рис.3, 5 представлены КЭ модель с приложенными нагрузками, а также результаты расчета.

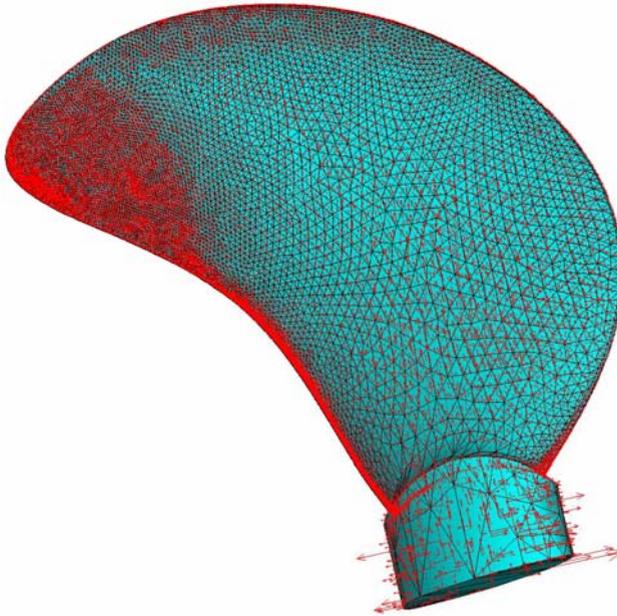


Рис.3. КЭ модель с приложенной нагрузкой

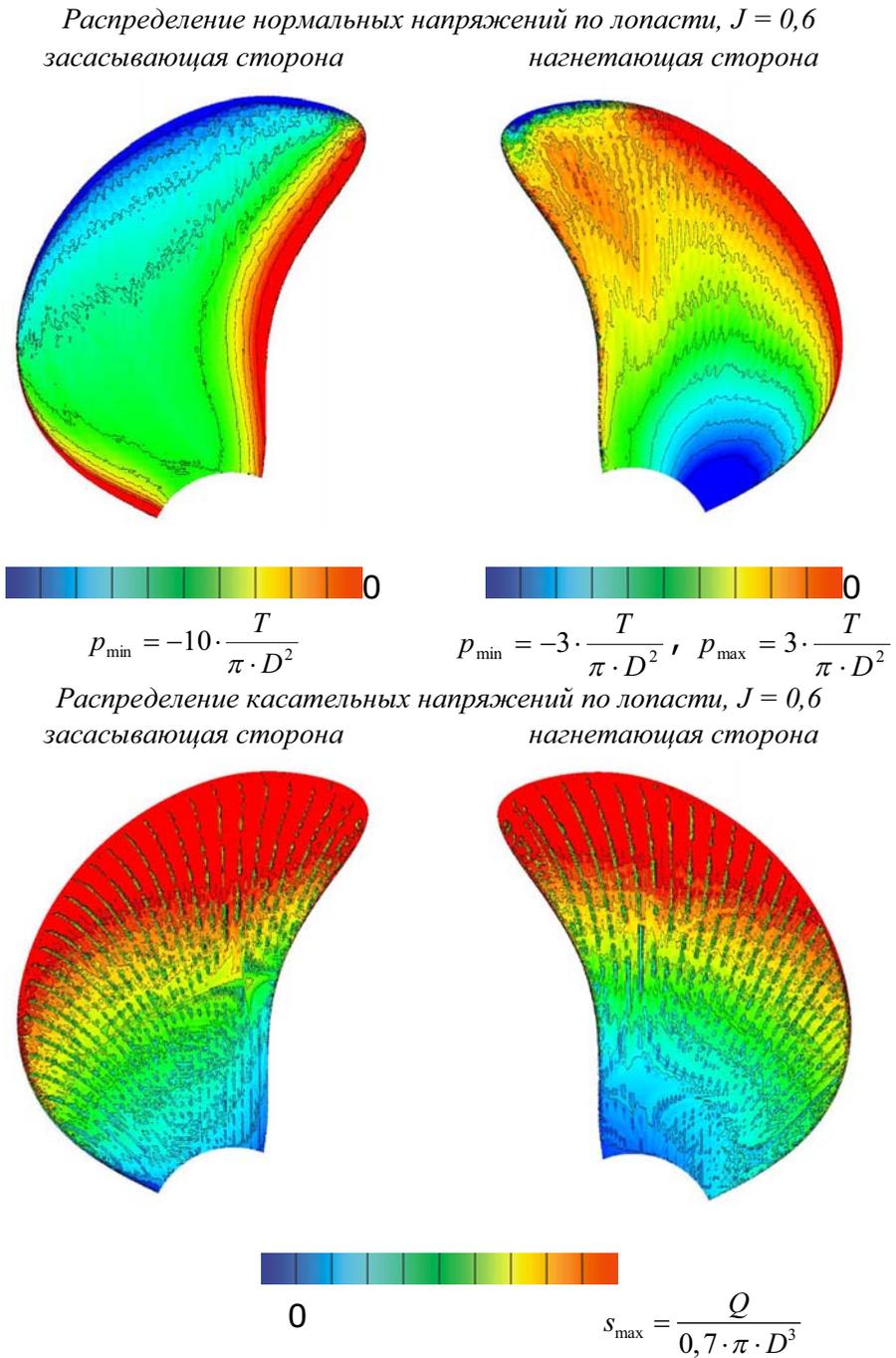


Рис.4. Распределение гидродинамических напряжений по поверхности лопасти

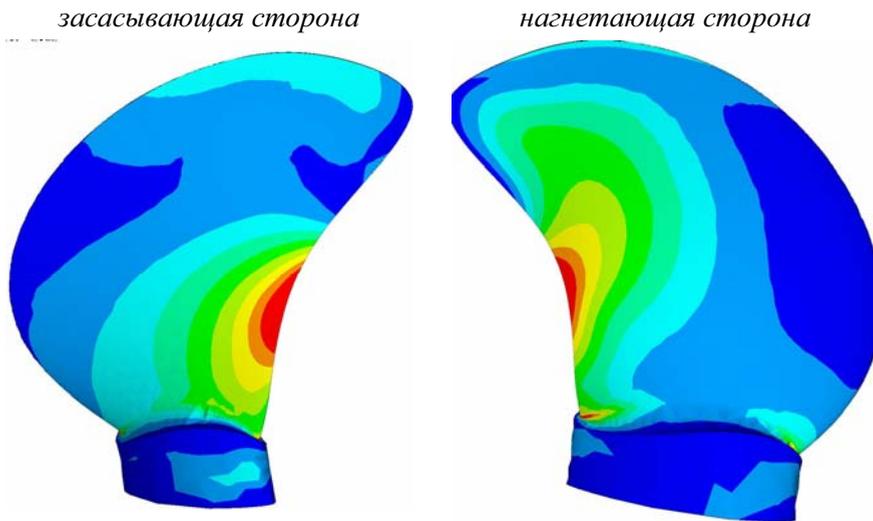


Рис.5. Распределение нормальных напряжений в лопасти

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. <http://www.nmri.go.jp/cfd/cfdws05/gothenburg2000/KCS/container.html>.
2. Постнов В.А. Численные методы расчета судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1977. – 279 с.
3. ANSYS. Theory Reference, Rel. 10.0-ANSYS Inc., Houston, 2004.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 629.12

С.Н. Баскаков

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧКИ ПРЯМОБОРТНЫХ ПОНТОНОВ НА ВОЛНЕНИИ

Сопоставлением результатов расчета кинематических характеристик качки прямобортных понтонов, базирующегося на результатах решения трехмерной гидродинамической задачи, с результатами модельного эксперимента подтверждена адекватность математической модели. Это дало возможность разработать инженерную методику оценки ускорений, действующих на палубный груз понтона при качке на морском волнении.

Ключевые слова: понтон, качка, нелинейное демпфирование, инерционные нагрузки, морское волнение, инженерная методика.

Порівнянням результатів розрахунку кінематичних характеристик хитавиці прямобортних понтонів, які базуються на результатах отриманих шляхом рішення тривимірної гідродинамічної задачі, з результатами модельного експерименту підтверджена адекватність математичної моделі. Це дало можливість розробити інженерну методику оцінки прискорень, що діють на палубний вантаж понтона при хитавиці на морському хвилюванні.

Ключові слова: понтон, хитавиця, нелінійне демпфування, інерційні навантаження, морське хвилювання, інженерна методика.

By comparison of results of calculation of kinematics descriptions of oscillatory motion rectangular pontoons, being based on results decision of three-dimensional hydrodynamic task, with the results of model experiment adequacy of mathematical model is confirmed. It enabled to develop the engineering method of estimation of accelerations, operating on the deck cargo of pontoon at tossing on marine agitation.

Keywords: pontoon, oscillatory motion, nonlinear damping, inertia loadings, seaway, engineering methods.

Актуальность. Одной из возможных технологий транспортировки тяжеловесных и крупногабаритных грузов является их перевозка на транспортных понтонах. Применение методик разработанные для обычных судов для оценки возникающих при качке понтонов инерционных нагрузок, некорректно.

Цель работы состоит в сопоставлении результатов полученных на основе математической модели качки прямобортных понтонов, базирующейся на результатах решения трехмерной гидродинамической зада-

чи, с данными модельного эксперимента и разработке на этой основе приближенной методики определения инерционных нагрузок, действующих на палубный груз прямобортного понтона при качке на морском волнении.

Изложение основного материала. В общем случае качка судна, как твердого тела, описывается системой шести обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка [1]. Если тело симметрично относительно диаметра и миделя, а его качка изучается в линейном приближении на двумерном регулярном волнении, в предположении о малости колебаний, то исходная система шести уравнений распадается на комплекс из двух независимых уравнений, описывающих вертикальную качку и рыскание и две системы из двух уравнений каждая, описывающих совместную поперечно-горизонтальную и бортовую качку (в дальнейшем поперечная качка), а также продольно-горизонтальную и килевую качку (продольная качка).

Дифференциальные уравнения качки понтона имеют следующий вид.

Вертикальная качка

$$\left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right)\ddot{\zeta} + \mu_{33}\dot{\zeta} + \gamma S \zeta = X_3^C \cos \sigma t + X_3^S \sin \sigma t. \quad (1)$$

Рыскание

$$(I_{xx} + \lambda_{66})\ddot{\chi} + \mu_{66}\dot{\chi} = X_6^C \cos \sigma t + X_6^S \sin \sigma t. \quad (2)$$

Поперечная качка

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{D}{g} + \lambda_{22}\right)\ddot{\eta} + \lambda_{24}\ddot{\theta} + \mu_{22}\dot{\eta} + \mu_{24}\dot{\theta} = \\ = X_2^C \cos \sigma t + X_2^S \sin \sigma t \\ (I_{yy} + \lambda_{44})\ddot{\theta} + \lambda_{24}\dot{\eta} + \mu_{44}\dot{\theta} + \mu_{24}\dot{\eta} + Dh_0\theta = \\ = X_4^C \cos \sigma t + X_4^S \sin \sigma t \end{array} \right. \quad (3)$$

Продольная качка

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{D}{g} + \lambda_{11}\right)\ddot{\xi} + \lambda_{15}\ddot{\psi} + \mu_{11}\dot{\xi} + \mu_{15}\dot{\psi} = \\ = X_1^C \cos \sigma t + X_1^S \sin \sigma t \\ (I_{xx} + \lambda_{55})\ddot{\psi} + \lambda_{15}\dot{\xi} + \mu_{55}\dot{\psi} + \mu_{15}\dot{\xi} + DH_0\psi = \\ = X_5^C \cos \sigma t + X_5^S \sin \sigma t \end{array} \right. \quad (4)$$

В уравнениях (1)-(4) обозначено:

D – весовое водоизмещение судна;

g – ускорение силы тяжести;

$\lambda_{ij}, \mu_{ij}, X_i^C, X_i^S$ – присоединенные массы, демпфирование, косинусная и синусная составляющие возмущающих сил при продольно-горизонтальной ($i = j = 1$), поперечно-горизонтальной ($i=j=2$) и вертикальной качке ($i=j=3$);

$\lambda_{ij}, \mu_{ij}, X_i^C, X_i^S$ присоединенные моменты инерции, демпфирование, косинусная и синусная составляющие возмущающего момента при бортовой ($i=j=4$), килевой качке ($i=j=5$) и рыскании ($i=j=6$);

λ_{ij}, μ_{ij} коэффициенты связи по скоростям и ускорениям между продольно-горизонтальной и килевой качкой ($i=1, j=5$) и поперечно-горизонтальной качкой и рысканием ($i=2, j=4$);

$\xi, \ddot{\xi}$ – амплитуды скорости и ускорения при продольно-горизонтальной качке;

$\eta, \ddot{\eta}$ – амплитуды скорости и ускорения при поперечно-горизонтальной качке;

$\zeta, \dot{\zeta}, \ddot{\zeta}$ – амплитуды перемещения, скорости и ускорения при вертикальной качке;

$\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ – амплитуды перемещения, скорости и ускорения при бортовой качке;

$\psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}$ – амплитуды перемещения, скорости и ускорения при килевой качке;

$\chi, \ddot{\chi}$ – амплитуды скорости и ускорения при поперечно-горизонтальной качке;

h_0, H_0 – поперечная и продольная метацентрические высоты;

σ – частота колебаний

t – время.

Для примера ниже приведено решение системы дифференциальных уравнений поперечной качки. Перепишем систему уравнений (3) в безразмерном виде

$$\begin{cases} \ddot{\eta} + L_{42}\ddot{\theta} + M_{22}\dot{\eta} + M_{42}\dot{\theta} = F_2^C \cos \sigma t + F_2^S \sin \sigma t \\ \ddot{\theta} + L_{24}\ddot{\eta} + M_{44}\theta + M_{24}\dot{\eta} + \omega^2\theta = F_4^C \cos \sigma t + F_4^S \sin \sigma t \end{cases} \quad (5)$$

Коэффициенты системы (5) безразмерены следующим образом:

$$\begin{aligned}
 L_{42} &= \frac{\lambda_{42}}{\left(\frac{D}{g} + \lambda_{22}\right)}; \quad M_{22} = \frac{\mu_{22}}{\left(\frac{D}{g} + \lambda_{22}\right)}; \quad M_{42} = \frac{\mu_{24}}{\left(\frac{D}{g} + \lambda_{22}\right)}; \\
 L_{24} &= \frac{\lambda_{24}}{(I_{xx} + \lambda_{44})}; \quad M_{44} = \frac{\mu_{44}}{(I_{xx} + \lambda_{44})}; \quad M_{24} = \frac{\mu_{24}}{(I_{xx} + \lambda_{44})}; \\
 F_2^{C,S} &= \frac{X_2^{C,S}}{\left(\frac{D}{g} + \lambda_{22}\right)}; \quad F_4^{C,S} = \frac{X_4^{C,S}}{(I_{xx} + \lambda_{44})}; \quad \omega^2 = \frac{Dh}{(I_{xx} + \lambda_{44})}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Амплитуды колебаний будем искать в виде

$$\begin{cases} \eta = \eta^C \cos \sigma t + \eta^S \sin \sigma t \\ \theta = \theta^C \cos \sigma t + \theta^S \sin \sigma t \end{cases} \tag{7}$$

где η^C и θ^C – косинусные составляющие амплитуд поперечно-горизонтальной и бортовой качки;

η^S и θ^S – синусные составляющие соответствующих амплитуд.

Синусные и косинусные составляющие амплитуд определяются из системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} -\sigma^2 \eta^S - M_{22} \sigma \eta^C - L_{42} \sigma^2 \theta^S - M_{42} \sigma \theta^C = F_2^S \\ -\sigma^2 \eta^C + M_{22} \sigma \eta^S - L_{42} \sigma^2 \theta^C + M_{42} \sigma \theta^S = F_2^C \\ -\sigma^2 \theta^S - M_{44} \sigma \theta^C - L_{24} \sigma^2 \eta^S - M_{24} \sigma \eta^C + \omega^2 \theta^S = F_4^S \\ -\sigma^2 \theta^C + M_{22} \sigma \theta^S - L_{24} \sigma^2 \eta^C + M_{24} \sigma \eta^S + \omega^2 \theta^C = F_4^C \end{cases} \tag{8}$$

Амплитуды качки вычисляются по формулам

$$\eta = \sqrt{(\eta^C)^2 + (\eta^S)^2}; \quad \theta = \sqrt{(\theta^C)^2 + (\theta^S)^2}. \tag{9}$$

Величины углов фазового сдвига определяются так:

$$\varepsilon_\eta = \arccos \frac{\eta^C}{\eta^S}; \quad \varepsilon_\theta = \arccos \frac{\theta^C}{\theta^S} \tag{10}$$

Из формул (7) следует, что синусные и косинусные составляющие перемещений, скоростей и ускорений центра тяжести связаны соотношениями

$$\begin{aligned} \dot{\eta}^C &= \sigma \eta^S; & \dot{\eta}^S &= -\sigma \eta^C; & \ddot{\eta}^C &= -\sigma^2 \eta^C; & \ddot{\eta}^S &= -\sigma^2 \eta^S; \\ \dot{\theta}^C &= \sigma \theta^S; & \dot{\theta}^S &= -\sigma \theta^C; & \ddot{\theta}^C &= -\sigma^2 \theta^C; & \ddot{\theta}^S &= -\sigma^2 \theta^S. \end{aligned} \quad (11)$$

Соответствующие им амплитуды скоростей и ускорений могут быть рассчитаны по формулам

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= \sqrt{(\dot{\eta}^C)^2 + (\dot{\eta}^S)^2}; & \dot{\theta} &= \sqrt{(\dot{\theta}^C)^2 + (\dot{\theta}^S)^2}; \\ \ddot{\eta} &= \sqrt{(\ddot{\eta}^C)^2 + (\ddot{\eta}^S)^2}; & \ddot{\theta} &= \sqrt{(\ddot{\theta}^C)^2 + (\ddot{\theta}^S)^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Решения для остальных видов качки имеют аналогичный вид.

Ускорения от качки понтона, действующие в точке М с координатами (x,y,z), в соответствии с [2] определяются выражениями

$$\begin{aligned} \ddot{\xi}_M &= \ddot{\xi} - \ddot{\chi}y + \ddot{\psi}z; \\ \ddot{\eta}_M &= \ddot{\eta} - \ddot{\theta}z + \ddot{\chi}x; \\ \ddot{\zeta}_M &= \ddot{\zeta} - \ddot{\psi}x + \ddot{\theta}y. \end{aligned} \quad (13)$$

Проекции полного ускорения на координатные оси получаются, если учесть соответствующие проекции силы тяжести

$$\begin{aligned} \ddot{X}_M &= \ddot{\xi}_M + \sin \psi; \\ \ddot{Y}_M &= \ddot{\eta}_M + \sin \theta; \\ \ddot{Z}_M &= \ddot{\zeta}_M + g. \end{aligned} \quad (14)$$

Гидродинамические характеристики качки, необходимые для расчета по описанному алгоритму были получены путем решения трехмерной гидродинамической задачи методом «склеивания» [3, 4, 5].

Расчет кинематических характеристик понтонов, имеющих ход относительно воды, выполняется аналогично. Различие состоит в том, что безразмерные гидродинамические характеристики качки определяются по

кажущейся частоте $\sigma_K = \sigma - \frac{\sigma^2}{g} V \cos \varphi$, где V – скорость хода, а φ – курсовой угол набегающего волнения.

Результаты решения были сопоставлены с результатами эксперимента, выполненного в опытовом бассейне ОНМУ.

Сопоставление результатов расчетов, выполненных в рамках линейной теории, и данных эксперимента, свидетельствует о завышении расчетных значений амплитуд бортовой и килевой качки по сравнению с экспериментальными. Это обусловлено неучетом вязкостной компоненты демпфирующих сил.

Рассмотрим на примере поперечной качки порядок решения системы уравнений, в которых учтены нелинейные демпфирующие силы, связанные с отрывным обтеканием понтона.

В этом случае уравнения поперечной качки имеют вид

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{g} + \lambda_{22}\right)\ddot{\eta} + \lambda_{24}\ddot{\theta} + \mu_{22}\dot{\eta} + B_2 2\dot{\eta}^2 + \mu_{24}\dot{\theta} &= X_2^C \cos \sigma t + X_2^S \sin \sigma t; \\ (I_{yy} + \lambda_{44})\ddot{\theta} + \lambda_{24}\dot{\eta} + \mu_{44}\dot{\theta} + B_4\theta^2 + \mu_{24}\dot{\eta} + Dh_0\theta &= X_4^C \cos \sigma t + X_4^S \sin \sigma t. \end{aligned} \quad (15)$$

Введем в уравнение (3) полученные автором [6] выражения для демпфирующих сил, изменяющихся по квадратичному закону, обусловленных вязкостью жидкости В соответствии с рекомендациями А.М. Басина [7] квадратичный закон сопротивления качке заменен линейным из условия, что работа сил сопротивления за период колебаний судна при этих двух законах одинакова. Для этого в нелинейное дифференциальное уравнение бортовой качки вводим демпфирующий момент в виде $(\mu_{44} + 0,85B_4\sigma\theta_m)\dot{\theta}$, а в уравнение поперечно-горизонтальной качки демпфирующую силу $(\mu_{22} + 0,85B_2\sigma\eta_m)\dot{\eta}$.

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{g} + \lambda_{22}\right)\ddot{\eta} + \lambda_{24}\ddot{\theta} + (\mu_{22} + 0,85B_2\sigma\eta_m)\dot{\eta} + \mu_{24}\dot{\theta} &= \\ = X_2^C \cos \sigma t + X_2^S \sin \sigma t; \\ (I_{yy} + \lambda_{44})\ddot{\theta} + \lambda_{24}\dot{\eta} + (\mu_{44} + 0,85B_4\sigma\theta_m)\dot{\theta} + \mu_{24}\dot{\eta} + Dh_0\theta &= \\ = X_4^C \cos \sigma t + X_4^S \sin \sigma t. \end{aligned} \quad (16)$$

Первые слагаемые демпфирующих сил – это линейные коэффициенты волнового демпфирования, обусловленные весомостью жидкости, вторые – линеаризованные коэффициенты, учитывающие наличие отрывной составляющей сопротивления качке. Они зависят от амплитуд поперечно-горизонтальной и бортовой качки.

Заметим, что структура линеаризованного коэффициента сопротивления бортовой качки полностью соответствует формуле Бертена [7] для судов с традиционной формой корпуса.

Обоснованность описанного подхода подтверждена экспериментально. На рис.1 представлена зависимость от частоты коэффициента демпфирования бортовой качки прямоугольного понтона с $B/T=2,00$ и $L/B=10,45$.

Пунктирная кривая соответствует значениям волнового демпфирования, а сплошные – значениям суммы волнового и линеаризованного вязкостного демпфирования. Линеаризованное вязкостное демпфирование вычислено по приведенным соотношениям для гармонических колебаний понтона по закону $\theta(t) = \theta_m \cos \sigma t$ при тех же значениях амплитуды θ_m , которые были реализованы в ходе эксперимента по определению коэффициента демпфирования в опытовом бассейне. Экспериментальные данные, приведенные на рис.1, получены Дж. Вюгтсом [8].

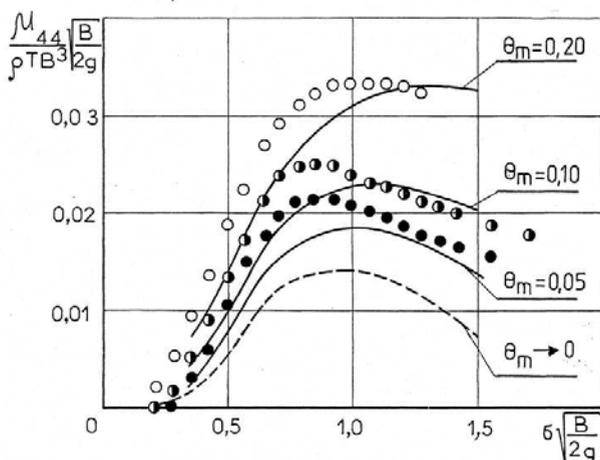


Рис.1. Зависимость от частоты коэффициента демпфирования бортовой качки прямоугольного понтона с $B/T=2,00$ и $L/B=10,45$

Решение системы уравнений поперечной качки находится методом последовательных приближений. На первом шаге решения вязкостная составляющая демпфирования принимается равной нулю, на втором шаге в формулу для вязкостной компоненты демпфирования подставляется значение амплитуды, полученное на первом шаге и так продолжается до тех пор, пока расхождение между задаваемой и получаемой амплитудами качки не будет удовлетворять заданной точности. В расчетах настоящей работы допустимое расхождение принималось равным 1 %.

Нелинейные уравнения, описывающие продольную, вертикальную качку и рыскание решаются аналогично.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчетного и экспериментального определения амплитуд бортовой качки понтонов № 1 и № 2. Характеристики понтонов представлены в таблице 1. В носу и корме понтоны имеют небольшие подрезы.

Таблиця 1

Характеристики моделей понтонов

Характеристика	Размерность	Понтон № 1	Понтон № 2
Длина, L	м	2,600	2,600
Ширина, B	м	0,730	0,730
Осадка, T	м	0,075	0,075
Коэффициент общей полноты, δ	-	0,948	0,948
Продольная метацентрическая высота, H_0	м	7,923	7,923
Поперечная метацентрическая высота, h_0	м	0,273	2,148
Момент инерции масс относительно оси Gx , I_x	кг·м ²	0,613	3,639
Момент инерции масс относительно оси Gy , I_y	кг·м ²	0,382	0,768
B/T	-	9,723	19,600
L/B	-	3,562	1,769

Сопоставление расчетного и экспериментального определения амплитуд бортовой качки показало, что:

- амплитуды бортовой качки, полученные в эксперименте и расчетным путем, лучше всего согласуются, если в качестве оси, вокруг которой происходят колебания, принимается ось, лежащая в плоскости ватерлинии. Это, по-видимому, обусловлено влиянием системы крепления модели в экспериментальной установке. В расчетах кинематики для условий реальной эксплуатации понтона в качестве оси колебаний принималась ось, проходящая через центр тяжести понтона;

- при выполнении расчетов бортовой качки волновой компонентой демпфирующих сил можно пренебречь.

- в целом, результаты расчета и эксперимента достаточно хорошо согласуются друг с другом, на основании чего можно сделать вывод об адекватности физической и математической моделей.

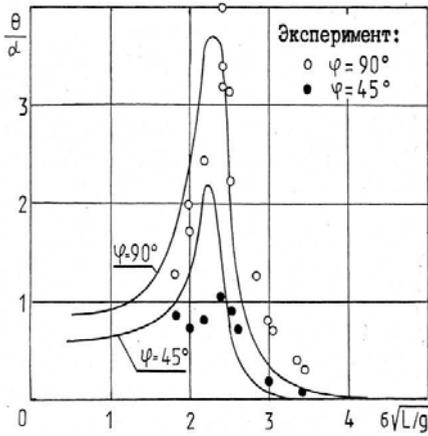


Рис. 2. Коэффициент динамичности при бортовой качке понтона № 1

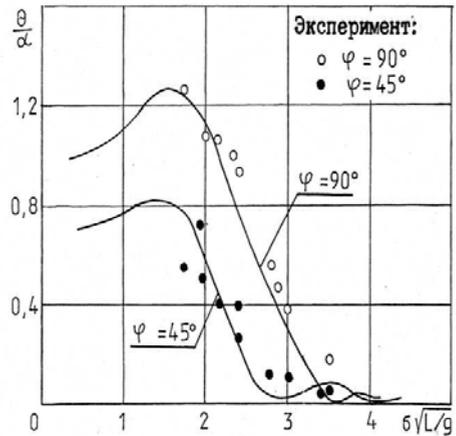


Рис. 3. Коэффициент динамичности при бортовой качке понтона № 2

На рис. 4 и 5 приведены результаты расчетного и экспериментального определения амплитуд килевой качки понтонов № 1 и № 2.

Сопоставление амплитуд килевой качки, полученных расчетным и экспериментальным путем показало, что результаты эксперимента и расчета обнаруживают удовлетворительное совпадение. Расчетные значения амплитуд в резонансной зоне значительно превосходят значения амплитуд, полученные в эксперименте. Это может быть связано с наличием подрезов на моделях понтонов, что приводит к изменению демпфирования, что не учитывается в теоретическом расчете.

Для тех же двух понтонов на рис. 6-9 представлены некоторые результаты сопоставления величин проекций на координатные оси амплитуд полного ускорения, в точке М с координатами ($z = 0$; $y = B/2$; $z = 10T$).

Полученные результаты были обобщены на случай двумерного нерегулярного волнения по стандартным методикам. В качестве расчетного принят рекомендуемый двухпараметрический спектр морского волнения [1].

$$S_{\zeta}(\sigma) = 9.43 \frac{m_0}{\bar{\sigma}} \left(\frac{m_0}{\bar{\sigma}} \right)^6 - \exp \left[-1.5 \left(\frac{m_0}{\bar{\sigma}} \right)^4 \right], \quad (17)$$

где $m_0 = D_{\zeta}$ – дисперсия волновых ординат;

$\bar{\sigma}$ – средняя частота волнения;

σ_m – частота максимума спектра.

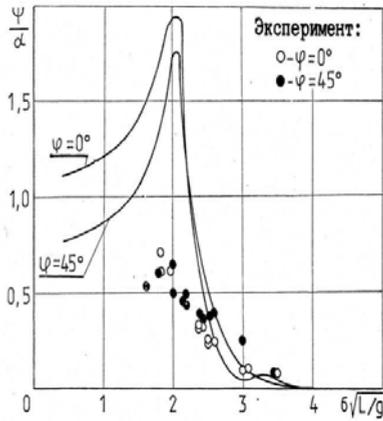


Рис. 4. Коэффициент динамичности при килевой качке понтона № 1

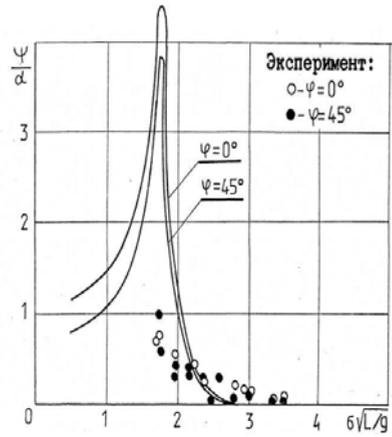


Рис. 5. Коэффициент динамичности при килевой качке понтона № 2

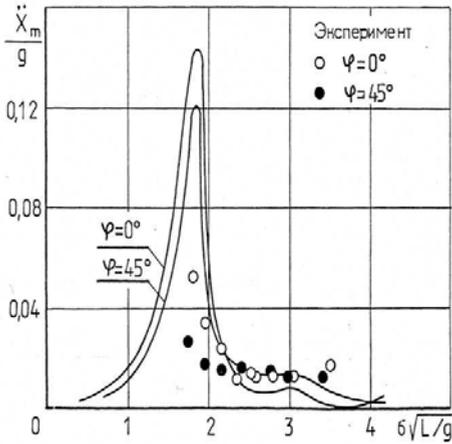


Рис. 6. Проекция полного ускорения на ось Ox , возникающего при качке понтона № 1

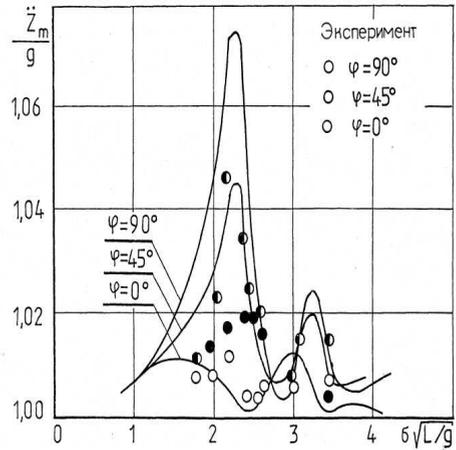


Рис. 7. Проекция полного ускорения на ось Oz , возникающего при качке понтона № 1

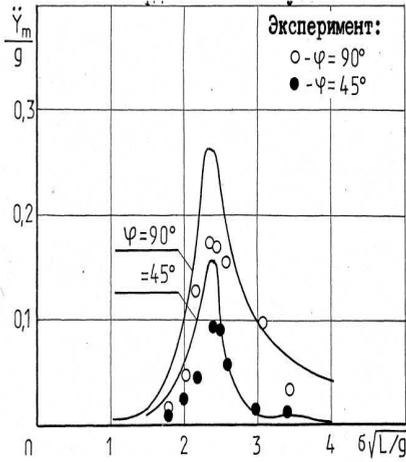


Рис.8. Проекция полного ускорения на ось Oy возникающего при качке понтона № 1

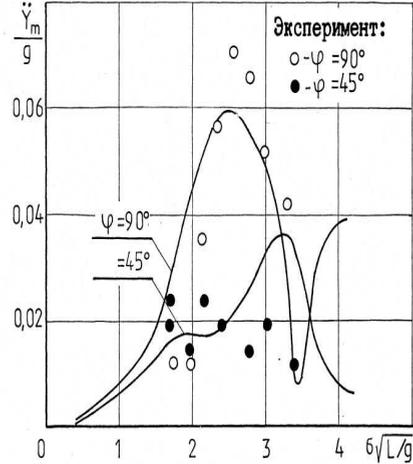


Рис.9. Проекция полного ускорения на ось Oy возникающего при качке понтона № 2

Средняя частота волнения связана с задаваемой балльностью соотношением

$$\bar{\sigma} = \frac{2\pi}{3,3\sqrt{h_{3\%}}} \quad (18)$$

где $h_{3\%}$ – высота волны 3 % обеспеченности, соответствующая заданной балльности и определяемая по шкале волнения ГУ ГМС 1953 года.

Расчеты вероятностных характеристик качки на нерегулярном волнении проводились по стандартной методике [1].

Конечной целью данной работы является определение максимальных амплитуд ускорений 3 % обеспеченности, возникающих при качке понтона. В связи с этим было исследовано влияние на них крутизны волн. На основании анализа результатов массовых расчетов, выполненных без процедуры статистической линеаризации, было установлено, что при увеличении крутизны волны амплитуды качки 3 % обеспеченности уменьшаются, а амплитуды ускорения растут. В качестве примера для понтона № 1 в табл. 2 приведены амплитуды бортовой качки и поперечного ускорения 3 % обеспеченности в точке с координатами $x = 0, y = 0,5 \text{ В}, z = 10 \text{ Т}$ вычисленные при различных значениях высот волн 3% обеспеченности и крутизны.

Таблиця 2

*Зависимость амплитуды бортовой качки 3 % обеспеченности
понтон № 1 от крутизны волны*

	$h_{3\%}, \text{ м}$	r / λ					
		1/40	1/60	1/80	1/100	1/120	1/200
$\theta_{3\%},$ градус	2	0,517	0,542	0,555	0,561	0,568	0,584
	3	1,654	1,827	1,901	1,944	1,990	2,072
	4	3,062	3,408	3,552	3,651	3,742	3,903
	5	4,434	4,905	5,103	5,255	5,384	5,616
$Y_{3\%/g}$	2	0,097	0,067	0,051	0,041	0,035	0,021
	3	0,232	0,165	0,127	0,103	0,088	0,054
	4	0,349	0,252	0,195	0,159	0,135	0,084
	5	0,438	0,317	0,245	0,200	0,170	0,106

В связи с изложенным, для упрощения расчетов и обеспечения безопасной погрешности, признано целесообразным массовые расчеты ускорений выполнять используя модель волны с максимальной крутизной и не прибегать к использованию метода статистической линеаризации.

В результате специальной проработки были определены геометрические и весовые элементы транспортных понтонов и эксплуатационные условия, характерные для практики перевозок в настоящее время и на перспективу. В частности, принято, что:

- форма подводной части представляет собой прямоугольный параллелепипед;
- длина понтонов L изменяется от 30 до 80 метров;
- отношение длины к ширине L/B изменяется от 3 до 6;
- отношение ширины к осадке B/T изменяется от 4 до 8;
- отношение поперечной метацентрической высоты к ширине судна h/B варьируется от 0,02 до 0,12;
- высота волны 3 % обеспеченности $h_{3\%}$ меняется в пределах от 2 до 5 метров;
- курсовой угол волнения φ изменяется в интервале от 0 до 180 градусов;
- скорость хода V может меняться в пределах от 0 до 5 узлов.

Таким образом усилие (или ускорение) A , действующее на палубный груз единичной массы, находящийся в точке с координатами x, y и z при качке понтона на морском волнении, описывается функцией

$$A = f(L, L/B, D/T, h_0/B, \varphi, Vs, x, y, z). \quad (19)$$

Для разработки инженерной методики, позволяющей оперативно определить нагрузки, действующие на палубный груз при качке понтона

на морском волнении, были произведены систематические расчеты кинематических характеристик понтонов на ЭВМ. Расчеты выполнялись в указанном выше диапазоне вариации переменных. Для уменьшения объема вычислений ускорения вычислялись в одной точке, с координатами $x = 0,4L$, $y = 0,4B$, $z = 3,5T$. При выполнении расчетов из 7 оставшихся переменных, шесть принимались в качестве параметров, а одна варьировалась.

В результате удалось получить набор зависимостей вида $A = f(L)$, $A = f(L/B)$ и т.д. Для примера на рис.10 приведены проекции на координатные оси полного ускорения 3 % обеспеченности при качке без хода (показано сплошной линией) и со скоростью хода 5 узлов (показано пунктирной линией) понтона длиной $L = 80$ м, $L/B = 3,5$, $B/T = 4,0$, $h/B = 0,07$ в зависимости от величины курсового угла волнения φ при высотах волн 3 % обеспеченности $h_{3\%} = 2, 3, 4$ и 5 м. Для исключения из рассмотрения переменных φ и V_s определялись наибольшие значения ускорений для каждой комбинации параметров и в дальнейшем рассматривались только максимальные значения ускорения.

Расчеты показали, что влиянием хода при рассмотрении поперечного и вертикального ускорений можно пренебречь в то время, как продольное ускорение сильно зависит от скорости хода. Дальнейшая обработка велась методами регрессионного анализа. В результате предложены следующие приближенные аппроксимационные формулы:

$$\begin{aligned} \bar{X} &= 0,77 - (8,60 - 0,94h_{3\%}) \frac{L}{1000}; \\ \bar{Y} &= \left\{ 0,08 + \left[0,325 \frac{L}{B} - 0,218 + \left(4,0 - 3,3 \frac{L}{B} \right) \frac{L}{1000} \right] \frac{h_{3\%}}{10} \right\} \times \\ &\times \left(0,76 + 13 \frac{h_0}{B} \right) \left(1,38 - 0,094 \frac{B}{T} \right); \\ \bar{Z} &= 1,60 - (6,60 - 0,67h_{3\%}) \frac{L}{1000}. \end{aligned} \quad (20)$$

Здесь $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ – отношение наибольших инерционных усилий, действующих при качке понтона в направлении соответствующих координатных осей, к весу груза. Величина \bar{Z} включает вес груза. Необходимо подчеркнуть, что численные коэффициенты формул (20) являются размерными величинами.

На рис. 11-13 сопоставлены результаты расчета величин $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ по разработанной приближенной методике (показанную линиями) с частью результатов описанного выше массового расчета (показаны точками). Из графиков видно удовлетворительное совпадение искомых величин. Расчеты по формулам (20) обеспечивают ошибку в безопасную сторону.

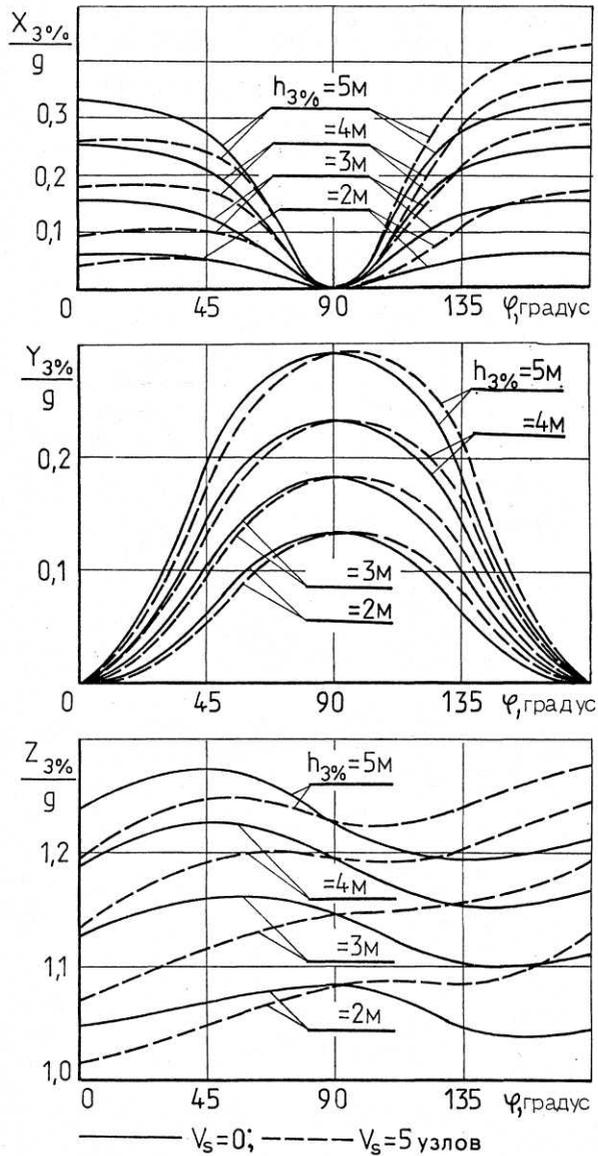


Рис.10. Проекції на координатні осі повного прискорення 3 % обеспеченості, виникаючого при качці понтона ($L = 80$ м; $L/B = 3,5$; $B/T = 4$; $h/B = 0,07$)

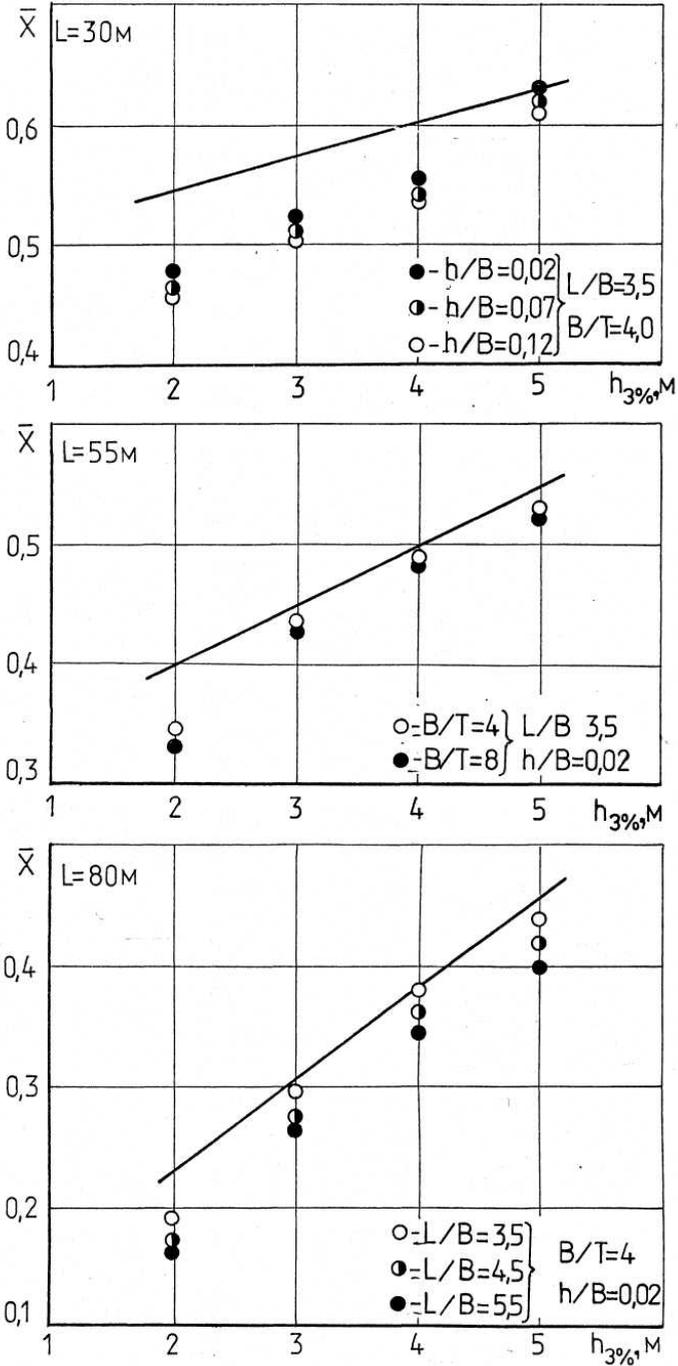


Рис.11. Сопоставление продольных составляющих инерционных нагрузок, определенных по приближенной методике, с результатами расчета

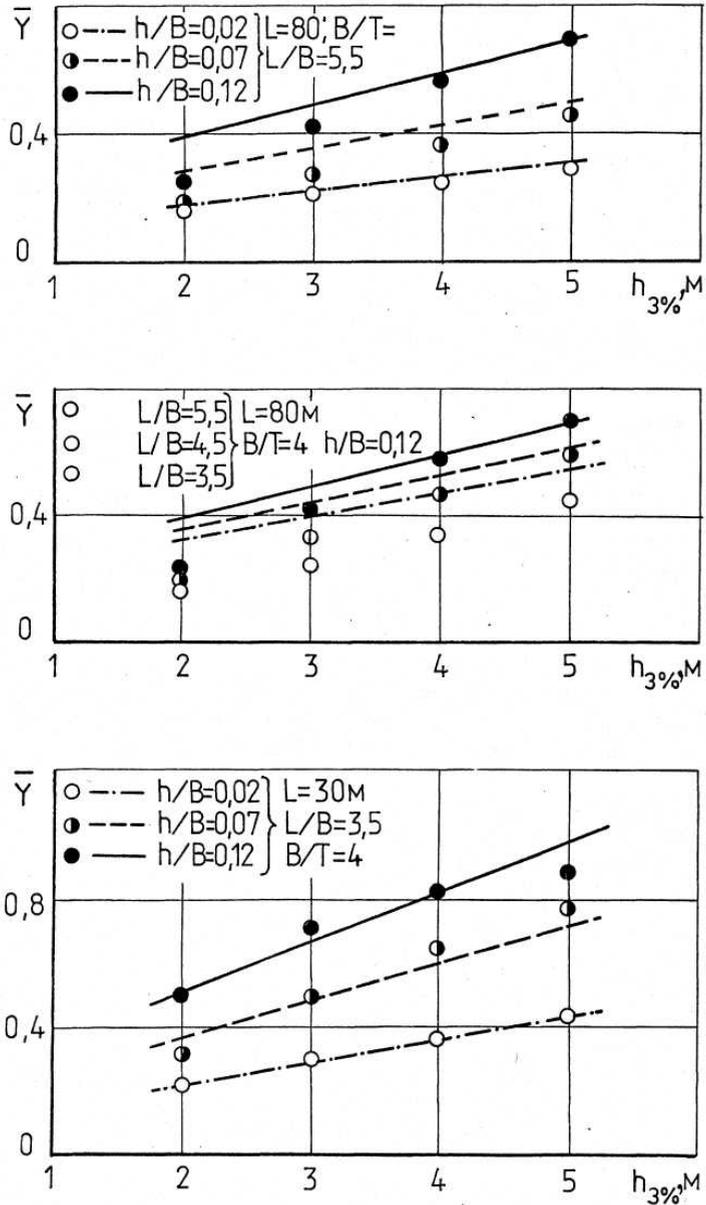


Рис.12. Сопоставление поперечных составляющих инерционных нагрузок, определенных по приближенной методике, с результатами расчета

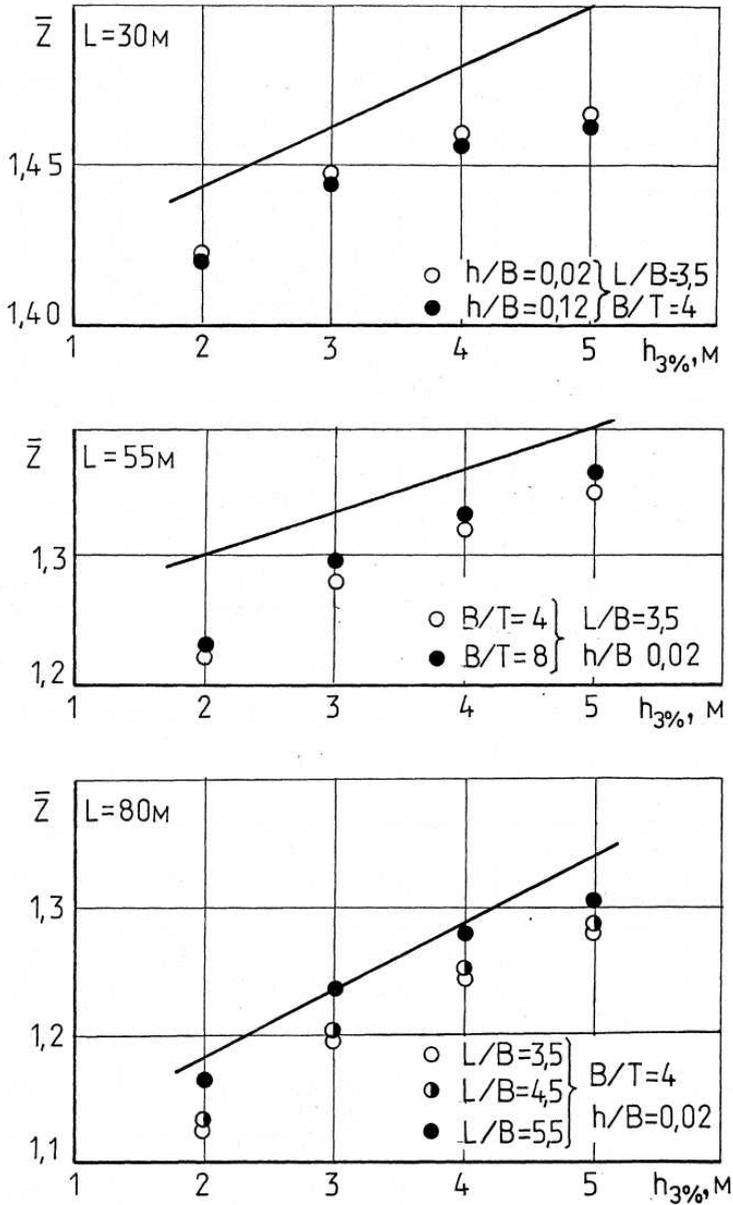


Рис.13. Сопоставление вертикальных составляющих инерционных нагрузок, определенных по приближенной методике, с результатами расчета

Выводы. Проведенное исследование подтвердило адекватность математической модели качки прямобортных понтонов, базирующуюся на результатах решения трехмерной гидродинамической задачи методом «склеивания» решений. Разработанная на этой основе приближенная методика определения инерционных нагрузок, действующих на палубный груз прямобортного понтона при качке на морском волнении, дает незначительную ошибку в безопасную сторону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Справочник по теории корабля. – Т. 2. Статика судов. Качка судов /Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.*
2. *Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Качка судов на морском волнении. – Л.: Судостроение, 1969. – 175 с.*
3. *Баскаков С.Н., Воробьев Ю.Л., Турлак А.А. Метод решения гидродинамических задач для плавучих объектов с вертикальными бортами. Физико-математическое моделирование при решении проблем гидродинамики и динамики судов и средств освоения океана (XXXIV Крыловские чтения 1989 г.): Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Л.: Судостроение. 1989. – С. 99-100.*
4. *Баскаков С.Н., Воробьев Ю.Л., Давыдов И.Ф. Гидродинамические задачи о качке прямобортных понтонов// Вісник Одеського національного морського університету. №8, 2001 р. С.8-23.*
5. *Воробьев Ю.Л. Баскаков С.Н. Гидродинамическая задача о вертикальной и килевой качке прямоугольного понтона с малой осадкой. XXI Югославский конгресс по теоретической и прикладной механике. Ниш, 1995. С.56-60.*
6. *Баскаков С.Н., Воробьев Ю.Л., Турлак А.А. Приближенный метод учета отрывной компоненты демпфирования в расчетах качки прямоугольного понтона//Современные проблемы судостроения и судоремонта: Сб.ОИИМФ. –М.: Мортехинформреклама, 1990. – С.5-9.*
7. *Басин А.М. Качка судов. – М.: Транспорт, 1969. – 272 с.*
8. *Vughts The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface//International Shipbuilding Progress. – July 1968. –V.15. – № 167. – P.251-276.*

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 629.12.073.243.4:532.59

А.В. Демидюк

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОПЫТОВОГО БАСЕЙНА ОНМУ

Рассмотрены вопросы модернизации опытового бассейна ОНМУ. Подробно рассмотрено специально созданное программное обеспечение, предназначенное для обработки результатов буксировочных испытаний. Показаны результаты тестирования системы измерений опытового бассейна ОНМУ, намечены пути дальнейшего совершенствования как аппаратной, так и программной частей системы.

Ключевые слова: система измерений, опытовый бассейн, буксировочные испытания, программное обеспечение.

Розглянуто питання модернізації дослідного басейну ОНМУ. Детально розглянуто спеціально створене програмне забезпечення, призначене для обробки результатів буксирувальних випробувань. Показано результати тестування системи вимірювань дослідного басейну ОНМУ, намічено шляхи подальшого удосконалення як апаратної, так і програмної частин системи.

Ключові слова: система вимірювань, дослідний басейн, буксирувальні випробування, програмне забезпечення.

The questions of modernization of ONMU towing tank are considered. Examined in detail the newly created software designed to handle the results of towing tests. Showing the results of testing of the ONMU towing tank measurement system, identified ways to further improves both hardware and software parts of the system.

Keywords: measurement system, towing tank, towing test, software.

С конца 90-х годов XX века в опытовом бассейне ОНМУ успешно действовала система сбора и обработки данных эксперимента, созданная под руководством инженера бассейна В.Н. Кириллова, основанная на использовании персонального компьютера (ПЭВМ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а также широкого набора датчиков. Она позволяла проводить комплексные исследования динамики судна, такие, как буксировочные испытания, определение гидродинамических и кинематических характеристик различных видов качки судна [1, 2, 3], а также другие виды испытаний [4].

Постановка проблемы. В последние годы остро встал вопрос о модернизации существующей системы измерений. Необходимость модернизации была вызвана старением аппаратной части системы, что приводило к сбоям в её работе. Кроме того, использование устаревшего

программного обеспечения накладывало жесткие ограничения на условия проведения эксперимента.

Изложение основного материала. Анализ проблемы позволил выделить два этапа модернизации. Задача первого этапа – создание базовой конфигурации аппаратной части системы измерений, подбор и создание первоочередного программного обеспечения для проведения наиболее востребованных видов экспериментальных исследований и обеспечения нужд учебного процесса, проведение тестирования аппаратной и программной частей системы. К первоочередным исследованиям следует отнести буксировочные испытания на тихой воде и на регулярном волнении, проведение опыта кренования, определение инерционных и демпфирующих характеристик модели судна. Задача второго этапа модернизации – обеспечение экспериментальных исследований качки, переход от аналоговых к цифровым датчикам и беспроводной передаче данных.

Силами сотрудников кафедры ТПК им. профессора Ю.Л. Воробьева проведен первый этап модернизации системы измерений опытового бассейна ОНМУ. В настоящее время измерительный тракт в целом состоит из производительной ПЭВМ на баз процессора Intel Core2Duo – центра сбора данных, АЦП E14-140 общего назначения, тензометрического усилителя АНЧ7М. Номенклатура датчиков включает струнные датчики волнового профиля, индукционные датчики перемещений, основанные на использовании тензорезисторов датчики крена, давлений, сил и моментов.

Главной задачей стал ввод в работу системы измерения скорости движения модели при буксировочных испытаниях. Аппаратная часть данной системы состоит из датчика скорости, преобразователя сигнала, АЦП E14-140 и ПЭВМ.

В программной части системы для обработки данных буксировочных испытаний применена отдельная процедура записи и обработки данных. Запись процесса изменения скорости при буксировочных испытаниях выполняется штатным программным обеспечением (ПО) аналого-цифрового преобразователя E14-140 – регистратором LGraph2. ПО LGraph2 имеет широкий спектр возможностей представления и редактирования данных и распространяется бесплатно [5]. Данные об изменении скорости модели в ходе её движения сохраняются на диск ПЭВМ и используются при обработке результатов эксперимента. Вид главного окна приложения LGraph2, регистрирующего данные АЦП, представлен на рис. 1.

Обработка данных, полученных при буксировочных испытаниях, выполняется с помощью специально созданного автором программного обеспечения Towspeed. Приложение написано на языке программирования C++ с использованием библиотек MFC и STL, что позволяет пользователю работать в привычной среде MS Windows. Главная задача Towspeed – анализ данных по скорости модели в процессе модельных

Входной информацией для программы является представленная в виде файла данных запись процесса изменения скорости во время прогона модели, вес тянущего и разгонного грузов; остальные параметры используются для документирования результатов.

В результате обработки данных прогона модели Towspeed создает текстовый файл результатов и выводит на экран процесс изменения скорости модели в графическом виде. Графическое представление процесса существенно облегчает принятие оператором решения по выбору величины разгонного груза или завершению конкретного этапа эксперимента (см. рис. 3).

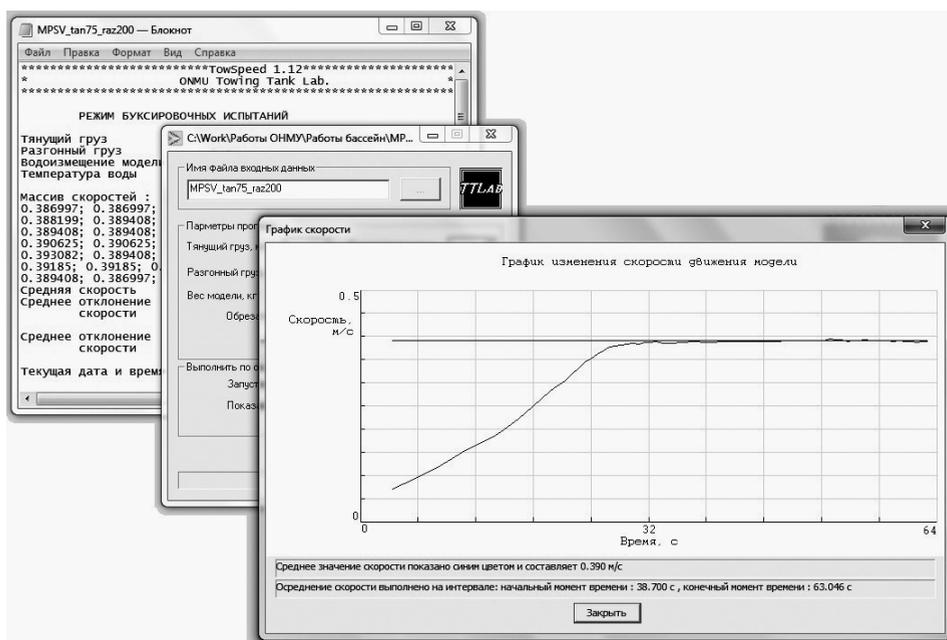


Рис. 3. Представление результатов работы приложения Towspeed

Рассмотрим подробнее алгоритм работы программы. Для определения скорости движения модели в опытовом бассейне ОНМУ используется следующая схема (см. рис. 4). При пробеге модели трос буксировочной системы (1) приводит во вращение измерительный шкив (2) и закрепленный соосно с ним диск (3). На диске (3) выполнены два отверстия размером 1,5x6,0 мм, расположенные по разные стороны от оси вращения. При прохождении одного из отверстий мимо фотодатчика (4), луч света от осветителя (5), попадая на фотодатчик, приводит к возникновению электрического импульса, который поступает в преобразователь сигнала. Набор импульсов, поступающих от фотодатчика, преобразуется в сигнал, который после обработки в АЦП записывается в виде двух массивов – массива кодов АЦП $y_i(t)$ и соответствующих

значений времени t_i . Общее количество элементов массивов N (число прочитанных АЦП кадров) определяется частотой работы АЦП и продолжительностью пробега модели.

Массив $y_i(t)$ содержит данные о частоте срабатываний фоторезистора датчика скорости и далее модифицируется согласно следующему алгоритму:

если $y_i(t) > y_{mid}$, то $y_i(t) = 1$,

если $y_i(t) \leq y_{mid}$, то $y_i(t) = -1$, $i = 0 - N$,

$$y_{mid} = y_{min} + (y_{max} - y_{min}) / 2.$$

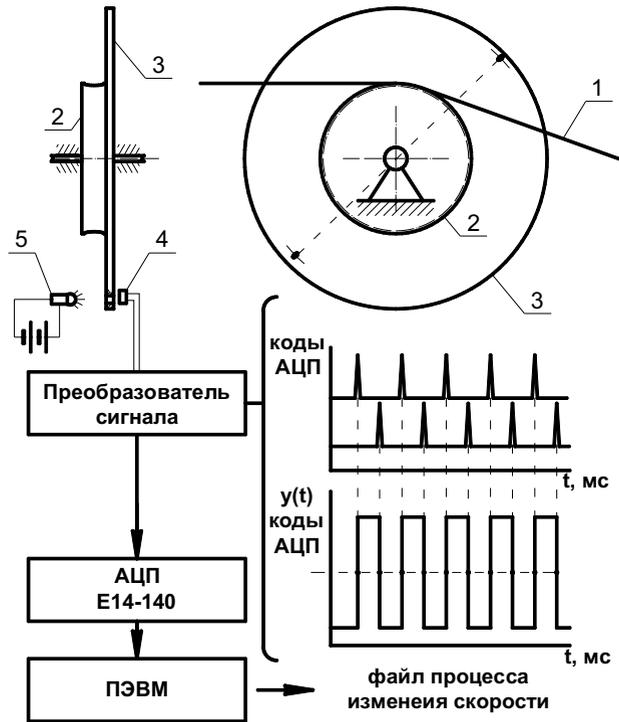


Рис. 4. Схема определения скорости движения модели в опытном бассейне ОНМУ

Для определения скорости движения модели необходимо найти «узлы» процесса – т.е. точки пересечения графика процесса с прямой $y(t) = y_{mid}$. Поиск «узлов» выполняется по следующему критерию: если произведение текущего и предыдущего значений процесса меняет знак, значит, достигнут «узел» процесса. Индекс массива, соответствующий «узлу», записывается в массив индексов k_i .

Известно, что за один оборот диска (3) (т.е. за два последовательных срабатывания датчика скорости), модель проходит

расстояние, равное 0,25 м. Следовательно, значение времени прохождения моделью этого расстояния и скорость её движения будут определяться выражениями

$$T_j = t_{k(2j+2)} - t_{k(2j)}, \text{ с}$$
$$S_j = \frac{0,25}{T_j}, \text{ м/с, } i = 0 - M,$$

где M – общее количество полных оборотов диска (3).

Осреднение скорости выполняется на мерном участке. Для его определения из всего массива S_j рассматривают только вторую половину. Поскольку новая аппаратная часть не ограничивает общее время пробега модели, в осреднение могут попасть значения скорости, соответствующие процессу торможения модели. Для получения корректных результатов участок торможения должен быть вырезан из массива S_j . Для этой цели в программе предусмотрена соответствующая возможность. Критерием при модификации массива S_j служит степень падения скорости движения модели ΔS_j

$$\Delta S_j = \left| \frac{S_{j+1} - S_j}{S_j} \right| \leq \text{SEPS}, \text{ SEPS} \sim 2 - 6\%.$$

Настройка параметра *SEPS* в программе реализована с помощью диалогового окна. Начальный и конечный моменты осреднения скорости движения модели фиксируются программой и выводятся в окне графического представления (см. рис. 3).

Отладка взаимодействия программной и аппаратной частей системы измерений опытового бассейна выполнена в ходе тестирования. Для этой цели были проведены буксировочные испытания двух моделей судов, проекты которых разработаны в Морском инженерном бюро: танкера проекта 005RST01 и многоцелевого спасательного судна MPSV007. Для танкера 005RST01 тестовой информацией являются данные буксировочных испытаний, выполненные в ОНМУ [6]. Основные характеристики судна и модели проекта 005RST01 приведены в табл. 1.

Результаты экспериментальных исследований, выполненных в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова [7] и Санкт-Петербургском государственном университете водных коммуникаций (СПГУВК) [8], использованы при верификации результатов буксировочных испытаний модели судна проекта MPSV007. Данные по судну и моделям проекта MPSV007 приведены в табл. 2.

Таблиця 1

Основные характеристики судна проекта 005RST01

Характеристика		Модель	Судно
Длина	$L, \text{ м}$	2,640	132,00
Ширина	$B, \text{ м}$	0,330	16,50
Осадка	$d, \text{ м}$	0,086	4,300
Коэффициент общей полноты	C_B		0,920
Водоизмещение	$V, \text{ м}^3$	0,0689	8616,6
Смоченная поверхность	$\Omega, \text{ м}^2$	1,259	3147,5
Масштаб модели		1:50	
Температура воды в бассейне	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	15	
Температура морской воды	$t_n, \text{ }^\circ\text{C}$		4
Плотность морской воды	$\rho, \text{ кгс с}^2/\text{м}^4$		0,1045
Глубина воды в бассейне	(H/d)	глубокая	вода
Высота волны	(h/ λ)	0	

Таблиця 2

Основные характеристики судна проекта MPSV007

Характеристика		Модель СПБГУВК	Модель ЦНИИ Крылова	Судно
Длина	$L, \text{ м}$	1,533	5,310	68,028
Ширина	$B, \text{ м}$	0,369	1,192	15,50
Осадка	$d, \text{ м}$	0,107	0,346	4,500
Коэффициент общей полноты	C_B	0,625	0,625	0,625
Водоизмещение	$V, \text{ м}^3$		1,368	3009,1
Смоченная поверхность	$\Omega, \text{ м}^2$		7,444	1272,4
Масштаб модели		1:42	1:13	-
Глубина воды в бассейне	(H/d)	глубокая		вода
Высота волны	(h/ λ)	0		

На рис. 5 приведены данные по полному сопротивлению r модели танкера 005RST01 в зависимости от скорости движения модели v . Анализ результатов экспериментальных исследований [6] и результатов тестовых буксировочных испытаний показывает хорошее количественное и качественное соответствие данных.

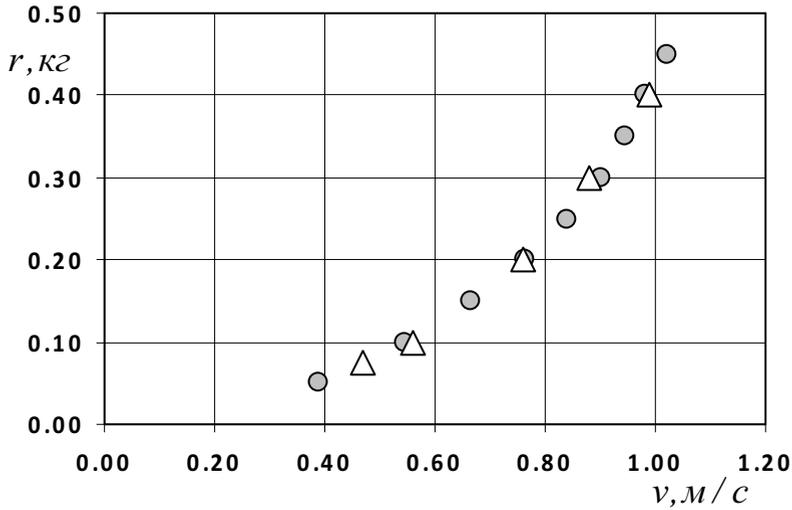


Рис. 5. Полное сопротивление модели танкера проекта 005RST01:

- – эксперимент ОНМУ 2007 г. [6];
- △ – эксперимент ОНМУ 2011 г.

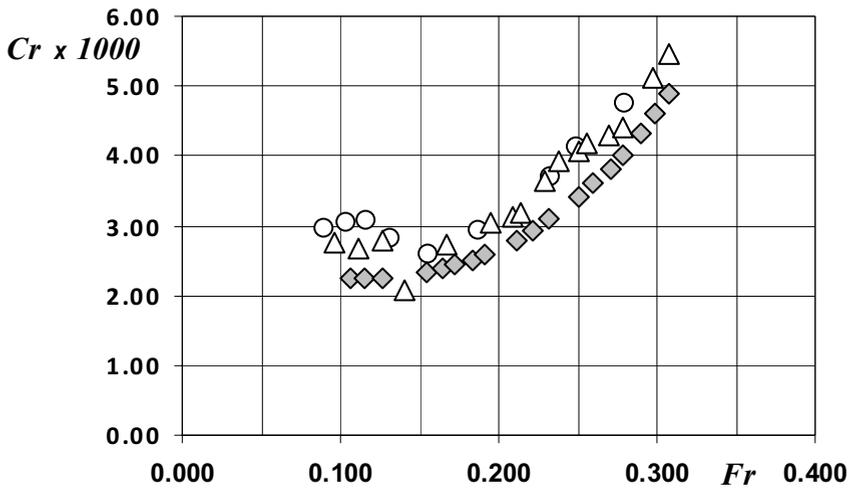


Рис. 6. Коэффициент остаточного сопротивления модели судна проекта MPSV007:

- – эксперимент ОНМУ 2011 г.;
- △ – эксперимент ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова [7];
- ◆ – эксперимент СПГУВК [8]

Для судна проекта MPSV007 на рисунке 6 приведено сравнение данных для коэффициента остаточного сопротивления C_r в зависимости от числа Фруда Fr . Сопоставление результатов, полученных в опытовом бассейне ОНМУ и данных, приведенных в работах [7, 8], показывает их удовлетворительное соответствие.

Выводы. В результате проведенной работы в опытовом бассейне ОНМУ выполнен первый этап модернизации. При этом состав аппаратной части системы измерения скорости движения модели изменен на 50 %, а состав программной – на 100 %. Проведен большой объем работ по тестированию различных частей системы. Результаты тестирования показывают, что система измерения скорости движения модели при буксировочных испытаниях позволяет получать стабильные результаты.

Актуальным остается вопрос о путях дальнейшего совершенствования системы измерений. Намечен ряд мероприятий, которые будут осуществляться в ближайшее время:

- Совершенствование программного обеспечения Towspeed.
- Создание ПО для обработки данных экспериментальных исследований качки судна.
- Модернизация кабельной системы и системы создания вынужденных колебаний модели – «качалки».

В долгосрочной перспективе будут рассмотрены также разработка и ввод в действие системы беспроводной передачи данных в цифровом формате и полное обновление аппаратной части системы измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов В.Н., Демидюк А.В., Тонюк В.И. Экспериментальная установка для исследования гидродинамических и кинематических характеристик продольной качки моделей судов // *Вісник ОДМУ*. – Одеса: ОДМУ, 1998. – № 1. – С. 90-93.
2. Демидюк А.В., Тонюк В.И. Экспериментальное определение гидродинамических и кинематических характеристик продольной качки тримарана // *Вісник ОНМУ*. – Одеса: ОНМУ, 2007. – № 23. – С. 81-88.
3. Воробьев Ю.Л., Демидюк А.В., Романадзе Д.Д. Определение гидродинамических и кинематических характеристик продольно-горизонтальных колебаний судна, ошвартованного к точечному причалу // *Вісник ОНМУ*. – Одеса: ОНМУ, 2009. – № 26. – С. 28-43.
4. Демидюк А.В. Экспериментальное исследование распределения гидродинамических давлений на модели качающегося судна // *Вісник ОНМУ*. – Одеса: ОНМУ, 2003. – № 12. – С. 65-68.

5. <http://www.lcard.ru/lgraph>
6. Давыдов И.Ф., Кириллов В.Н. Буксировочные испытания модели танкера пр. 005RST01 // Вып. МИБ.1185. – 25 с.
7. Execution of checking experimental investigation of hydrodynamic characteristics rescue ship project MPSV07 // Work report of KRSI hydrodynamic division. – St.-Petersburg: KRSI, 2009. – № FIN-V-10/2009. – P. 60.
8. Экспериментальная оценка ходовых качеств судна пр. MPSV07, разработка рекомендаций по корректировке обводов корпуса, измерение параметров качки, расчеты управляемости судна при ветре // Отчет НИР. – СПб.: СПГУВК, 2008. – № 28-113. – 51 с.

Стаття надійшла до редакції 17.11.11

УДК 629.12.073.243.4:532.59

Н.В. Ефремова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ ТРАЕКТОРИЙ
ПРИ ДВИЖЕНИИ МАЛОГО СУДНА
ВБЛИЗИ КРУПНОТОННАЖНОГО СУДНА, СИДЯЩЕГО НА МЕЛИ

Судоходство в районах недостаточных глубин приводит к увеличению числа посадок на мель. При снятии судна с мели буксир-спасатель (малое судно) работает на трехмерном волновом поле. Разработанная методика определения параметров качки малого судна позволяет выбирать такую траекторию его движения вблизи крупнотоннажного судна, при которой качка минимальна.

Ключевые слова: крупнотоннажное судно на мели, трехмерное волновое поле, качка малого судна.

Судноплавство у районах недостатних глибин веде до зростання кількості посадок на мілину. При знятті судна з мілини буксир-рятивник (мале судно) працює на тривимірному хвильовому полі. Розроблена методика визначення параметрів хитавиці малого судна дозволяє обирати таку траєкторію його руху, при якій хитавиця мінімальна.

Ключові слова: великотоннажне судно на мілині, тривимірне хвильове поле, хитавиця малого судна.

Navigation in the regions with insufficient depth leads to the increase of groundings number. Salvage tug (small vessel) is operated in the 3D wave field during setting a ship afloat. The developed method of motion trials of small vessel allows to define the trajectory with minimum motion of small vessel near the large-capacity one.

Keywords: large-capacity vessel aground, three-dimensional wave field, small vessel motions.

Введение. Посадка судна на мель входит в тройку самых опасных видов аварий. По данным [1] в период с 1980 по 2000 годы на этот вид аварийности приходится от 10% до 20% общего числа потерянных судов. Интенсивное судоходство в районах с недостаточными глубинами приводит к увеличению числа аварий с тяжелыми последствиями [2]. Для успешного проведения аварийно-спасательных работ по снятию судна с мели в первую очередь необходимы грамотные и своевременные действия экипажа и спасателей, адекватная оценка состояния судна и воздействия на него окружающего волнения. Вопрос взаимодействия корпуса аварийного судна с набегающим развитым морским волнением (конкретно-определение сил и моментов волновой природы) рассмотрен в [1]. В то же время работа судна-спасателя вблизи аварийного судна в сложных ветро-волновых условиях в литературе рассмотрена недостаточно.

Целью работы является определение траекторий движения малого судна (судна-спасателя, буксира, бункеровщика) вблизи крупнотоннажного судна, сидящего на мели, при которых качка малого судна будет минимальной. Рассмотрены две ситуации – подход малого судна для швартовки к крупнотоннажному и движение малого судна при стягивании крупнотоннажного с мели разворотом.

При постановке задачи принято, что сидящее на мели судно не может изменить положение относительно набегающего волнения и зазор между днищем судна и дном водоема отсутствует. Как показано в [3], волновое поле вокруг большого судна является существенно трехмерным. Вследствие дифракции волнения на корпусе большого судна со стороны набегания образуются стоячие волны, пучности которых удалены друг от друга на расстояние, примерно равное длине волны, а расположение их зависит от курсового угла волнения и длины волны.

На рис. 1 и 2 приведены волновые поля вокруг балкера "Зоя Космодемьянская" (форма корпуса которого типична для крупнотоннажных танкеров и балкеров) при относительной глубине акватории $H/T = 1,0$ (судно сидит на мели по всей своей длине), относительной длине волны $\lambda/L = 0,48$ и курсовых углах волнения $\beta = 90^\circ$ и $\beta = 135^\circ$. Главные размерения судна: $L = 201$ м, $B = 31,8$ м, $T = 11,73$ м. Значение длины волны принято по данному в [4] для Черного моря максимальному значению периода ветровых волн (кроме очень крупных штормовых) $\tau = 9$ с, измеренному вблизи аварийного судна.

Для определения амплитуд качки были рассчитаны волновые поля для той же относительной глубины и длины волны при курсовых углах волнения $\beta = 120^\circ$, $\beta = 150^\circ$, $\beta = 180^\circ$, а также при $\lambda/L = 0,8$ для всех указанных выше значений угла набегания. Данное значение длины волны соответствует периоду волн зыби $\tau = 15$ с, измеренному вблизи аварийного судна.

Все полученные результаты соответствуют воздействию на суда регулярного волнения, что, во-первых, может служить верхним пределом при оценке воздействия нерегулярного волнения, во-вторых, волны зыби с достаточной степенью точности можно считать регулярными.

Относительные амплитуды волнения $\bar{Z}_B = Z_B/a$ (a – амплитуда волнения на бесконечном удалении от корпуса судна) для указанных длин волн и курсовых углов волнения (кроме $\beta = 180^\circ$) приведены в таблице 1. Для волновых полей в области набегания приведены минимальные и максимальные значения относительных волновых амплитуд, для области тени – минимальные и (в скобках) средние значения.

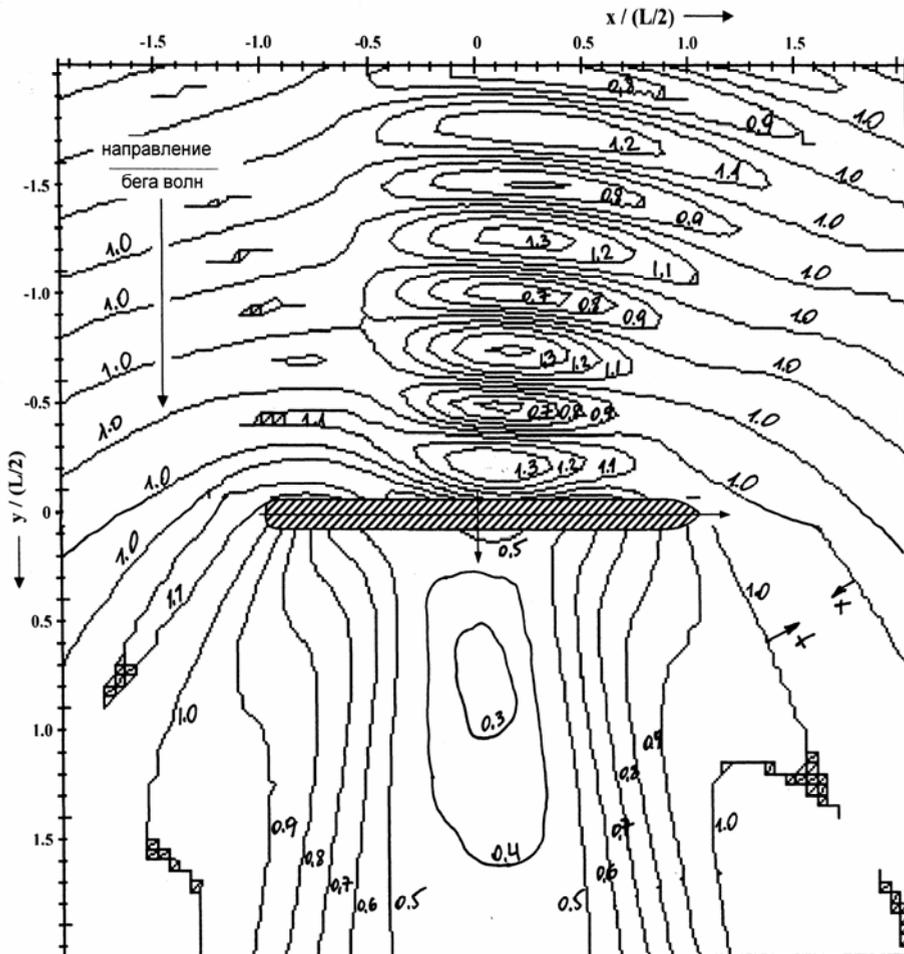


Рис 1. Волновое поле вокруг корпуса балкера
"Зоя Космодемьянская", сидящего на мели: $\beta = 90^\circ$, $\lambda/L = 0,48$

Таблица 1

Относительные амплитуды волнения
вокруг корпуса балкера "Зоя Космодемьянская", сидящего на мели

Курсовой угол волнения, град.	Относительная длина волны λ / L			
	0,48		0,8	
	набегание	тень	набегание	тень
90	1,44-0,54	0,28 (0,6)	1,40-0,64	0,54 (0,7)
120	1,40-0,60	0,44 (0,7)	1,30-0,76	0,74 (0,8)
135	1,38-0,68	0,50 (0,7)	1,20-0,76	0,72 (0,8)
150	1,26-0,70	0,60 (0,8)	1,12-0,82	0,80 (0,9)

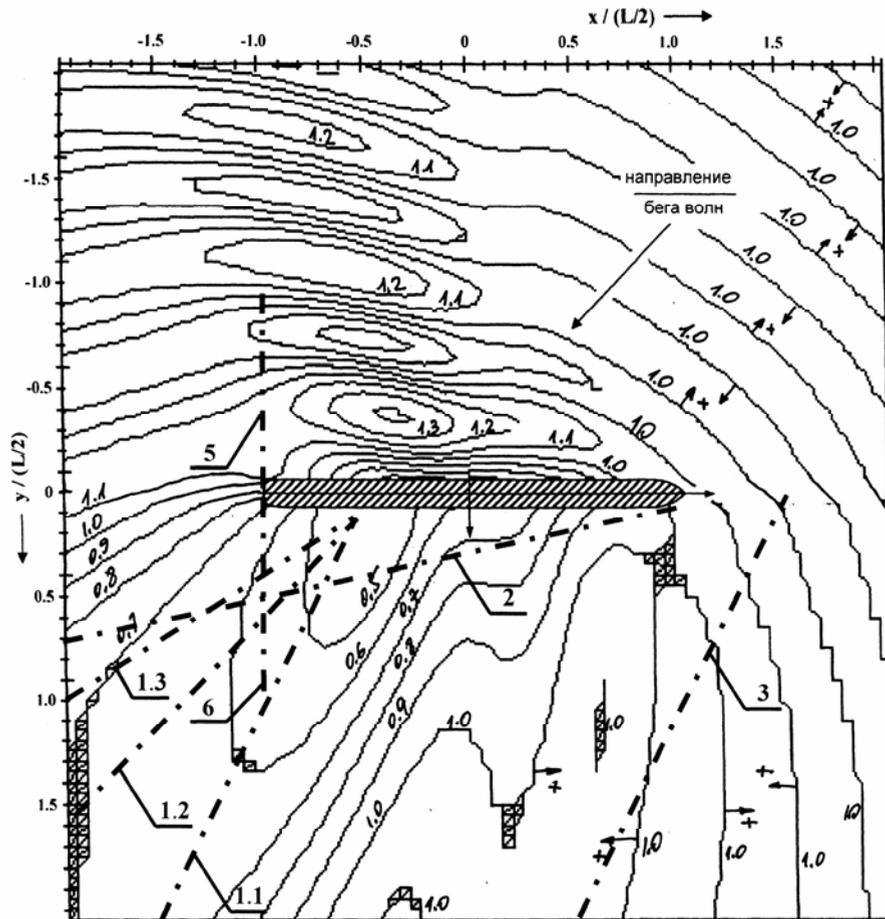


Рис 2. Волновое поле вокруг корпуса балкера "Зоя Космодемьянская",
сидящего на мели: $\beta = 135^\circ$, $\lambda L = 0,48$

При поперечном набегании ($\beta = 90^\circ$) в области гидродинамической тени наблюдается значительное уменьшение относительных амплитуд волнения. При косом набегании уменьшение не столь значительно, к тому же область тени менее выражена. Следует отметить для случаев косого набегания смещение областей образования пучностей и гидродинамической тени в соответствии с изменением угла набегания.

При расположении судна вразрез волнению ($\beta = 180^\circ$) относительные амплитуды волнения $\bar{Z}_B = Z_B / a$ изменяются от 0,5 до 1,5, зоны значительного уменьшения амплитуд – достаточно узкие полосы, расположенные симметрично по бортам судна, за кормой судна $\bar{Z}_B \approx 1$, впереди $0,9 \leq \bar{Z}_B \leq 1,1$.

Расчеты показывают, что чем длиннее волна, тем больше значения относительных волновых амплитуд в области гидродинамической тени и меньше разница между минимальными и максимальными значениями относительных волновых амплитуд в области набегания. Расположение и протяженность по длине и ширине судна зоны уменьшения амплитуд больше зависит от курсового угла волнения, чем от длины волны.

Определение безопасных траекторий подхода малого судна для швартовки к крупнотоннажному судну, стоящему на рейде, рассмотрено в [5]. Поскольку необходимость швартовки к аварийному судну на мели возникает достаточно часто, в данной работе методика выбора траекторий малого судна аналогична принятой в [5] (см. рис. 2):

- траектории 1.1, 1.2, 1.3 – движение в точку, расположенную примерно посередине зоны уменьшения амплитуд по длине принимающего судна (для $\lambda/L = 0,48$ это точка $x \approx -L/4$ при курсовых углах волнения $\beta = 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$);

- траектория 2 – подход к большому судну под углом 15° к его носовой оконечности;

- траектория 3 – подход к большому судну под углом 60° в точку, расположенную перед носовой оконечностью на расстоянии порядка длины малого судна;

- траектория 4 (на рисунке не показана) – проход малого судна вдоль борта большого на расстоянии 20 м.

Следует отметить, что выбор траекторий 2 и 3 соответствует рекомендациям [6] при швартовке к судну, стоящему на рейде. Судно, сидящее на мели, не рыскает под действием ветра и волнения, поэтому для каждого конкретного случая может быть принята траектория, отличная от приведенных.

По методике, описанной в [3], выполнены расчеты пяти видов качки судна-спасателя "Светломор-4" при его движении по каждой из траекторий 1.1-4 к судну типа "Зоя Космодемьянская", сидящему на мели. Выбраны значения относительной длины волн $\lambda/L = 0,48$ и $\lambda/L = 0,8$, крутизны волн $2a/\lambda = 1/40-1/100$, курсовых углов волнения $\beta = 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 180^\circ$. Главные размерения судна "Светломор-4": $L_l = 51,8$ м, $B_l = 14,0$ м, $T_l = 4,5$ м, поперечная метацентрическая высота $h = 1,0$ м. Скорость судна-оператора изменяется в диапазоне от 2 узлов на расстоянии порядка $2L$ от борта принимающего судна до $0,6$ узла к моменту начала швартовки.

Поскольку скорость судна достаточно мала, то амплитуды качки в принятом диапазоне скоростей и характеристик волнения, рассчитанные для кажущихся частот волнения, отличаются менее чем на 5 % от аналогичных величин, рассчитанных для истинной частоты. Кроме того, при расчете предполагалось, что малое судно последовательно занимает ряд фиксированных положений вдоль соответствующей траектории. Это предположение позволяет получить максимально возможные значения

амплитуд качки, так как вне зоны возможного резонанса амплитуда установившихся колебаний больше амплитуды неустановившихся колебаний, а для рассматриваемой пары судов при данных характеристиках волнения в области гидродинамической тени попадание в резонансную зону исключено.

Результаты расчетов вертикальной, бортовой и килевой качки судна "Светломор-4" при движении по указанным траекториям для относительной длины волны $\lambda/L = 0,48$ и выбранных значений курсовых углов приведены в таблице 2. Амплитуды угловых видов качки отнесены к максимальному углу волнового склона на бесконечном удалении от корпуса судна α_{\max} , амплитуда вертикальной качки – к амплитуде волнения на бесконечном удалении от корпуса судна. Значения относительных амплитуд вертикальной и килевой качки при $\lambda/L = 0,8$ в области гидродинамической тени достаточно близки к относительной амплитуде волнения и углу волнового склона соответственно, бортовой – примерно вдвое меньше, чем килевой, поперечно-горизонтальной и рыскания – пренебрежимо малы.

В работе предусматривается стягивание с мели крупнотоннажного судна разворотом, поскольку продольное стягивание, как правило, является затруднительным. Траектории движения малого судна при стягивании крупнотоннажного с мели разворотом за кормовую оконечность обозначены 5 и 6 на рис. 2.

Выводы. При движении малого судна вразрез набегающему волнению примерно посередине зоны уменьшения волновых амплитуд (т.е. по траекториям 1.1 – 1.3) амплитуды качки меньше, чем при движении по другим траекториям.

Амплитуды качки малого судна, движущегося вблизи крупнотоннажного судна, сидящего на мели ($H/T = 1,0$), превышают соответствующие значения амплитуд качки, определенные для той же пары судов в условиях рейдовой стоянки большей глубины ($H/T = 1,3$) [5].

Поскольку при стягивании разворотом направление движения существенно зависит от конкретных условий на месте аварии, может оказаться так, что буксир должен работать со стороны набегающего. В этой ситуации расположение пучностей существенно повлияет на выбор длины буксирного троса и на направление движения буксира. Возможно также, что целесообразно вообще отказаться от тянущих движений буксира, а применять только толкание (работа «на укол»).

Применение данной методики расчета качки позволяет также определить относительные перемещения заданной точки малого судна, занимающего заданное положение около судна, сидящего на мели.

Таблиця 2

*Относительные амплитуды качки судна-спасателя "Светломор-4"
при его движении вокруг корпуса балкера " Зоя Космодемьянская",
сидящего на мели*

Номер траектории	Индекс вида качки	Курсовой угол набегающего волнения				
		90 °	120 °	135 °	150 °	180 °
1.1	3	-	0,56-0,72	-	-	-
	4	-	0,05-0,47	-	-	-
	5	-	0,17-0,20	-	-	-
1.2	3	-	-	0,46-0,62	-	-
	4	-	-	0,05-0,21	-	-
	5	-	-	0,12-0,24	-	-
1.3	3	-	-	-	0,84-1,12	-
	4	-	-	-	0,07-0,16	-
	5	-	-	-	0,26-0,28	-
2	3	0,42-0,71	0,45-1,13	0,38-0,96	0,88-1,26	0,84-1,46
	4	0,06-0,14	0,40-1,20	0,14-0,22	0,02-0,19	0,03-0,85
	5	0,08-0,30	0,07-0,29	0,08-0,32	0,29-0,42	0,36-0,59
3	3	0,90-1,12	1,10-1,24	0,88-1,24	1,24-1,26	0,88-1,21
	4	0,08-0,42	0,42-1,16	0,06-0,21	0,05-0,19	0,001-0,19
	5	0,39-0,63	0,22-0,26	0,38-0,54	0,41-0,42	0,42-0,52
4	3	-	0,51-1,26	0,92-1,12	0,72-1,31	0,88-1,48
	4	-	0,53-1,04	0,12-0,75	0,06-0,55	0,07-0,85
	5	-	0,08-0,31	0,40-0,70	0,29-0,42	0,40-0,63
5	3	0,70-1,32	-	0,66-1,44	-	-
	4	0,04-0,09	-	0,03-0,09	-	-
	5	0,40-0,60	-	0,38-0,48	-	-
6	3	0,86-0,92	-	0,54-0,66	-	-
	4	0,02-0,03	-	0,02-0,04	-	-
	5	0,28-0,44	-	0,28-0,54	-	-

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Нильва А.Е. Силы волновой природы, действующие на судно на значительном мелководье и мели: Дис. ... канд. техн. наук / А.Е. Нильва. – Одесса: ОГМУ, 2001. – 202 с.
2. Егоров Г.В. Анализ событий шторма 11 ноября 2007 года в Керченском проливе // Зб. наук. ст. до Міжнародної наук.-практ.конф., „Екологічні проблеми Чорного моря” / Одеський інноваційно-інформаційний центр „ІНВАЦ”. – Одеса: ІНВАЦ, 2000. – С.81-83.

3. *Ефремова Н.В. Определение параметров качки малого судна при подходе к судну-партнеру на рейдовой стоянке: Автореферат дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Ефремова. – Одесса: ОГМУ, 2001.– 20 с.*
4. *Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. – Л.: Транспорт, 1974. – 359 с.*
5. *Ефремова Н.В. Определение безопасных траекторий при подходе малого судна для швартовки к крупнотоннажному судну на рейдовой стоянке // Вісник ОДМУ: Зб. наук.праць – 2001. – № 7. – С. 43-49.*
6. *Справочник капитана дальнего плавания / Под ред. Г.Г. Ермолаева. – М.: Транспорт, 1988. – 248 с.*

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 642.242

В.М. Кушнир, В.Р. Душко, И.Н. Морева,
О.А. Иванова, С.В. Федоров

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКЕАНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ВОЛНОВЫХ БАССЕЙНАХ

Дано описание цифровой системы для проведения лабораторных исследований пространственных волновых колебаний плавучих океанотехнических систем (буровых платформ, судов, терминалов). В состав этой системы входят цифровые волнографы и измеритель пространственных колебаний подвижного объекта. Приведены результаты использования цифровой системы в опытовом бассейне СевНТУ.

Ключевые слова: *опытовый бассейн, волнограф, пространственные колебания.*

Дано опис цифрової системи для проведення лабораторних досліджень просторових хвильових коливань плавучих океанотехнічних систем (бурильних платформ, суден, терміналів). До складу цієї системи входять цифрові хвильові вимірювачі та вимірник просторових коливань рухомого об'єкту. Приведені результати використання цифрової системи в хвильовому басейні СевНТУ.

Ключові слова: *хвильовий басейн, хвильовий вимірювач, вимірювач просторових коливань*

Description of the digital system is given for the carried out of the laboratory researches of spatial waves fluctuations of the floating ocean engineering. In the complement of this system enter digital wave meters and measuring device of spatial fluctuations of mobile object. The results of the use of the digital system are resulted in the wave SebNTU pool.

Keywords: *wave pool, wave meter, spatial fluctuation meter.*

Введение. Исследовательские работы в волновых (опытовых) бассейнах проводятся по многим направлениям прикладной гидродинамики, судостроения, морских технологий. Исторически первой проблемой таких исследований было определение силы сопротивления движению судна. Это связано с тем, что при проектировании корпуса судна необходимо решить два вопроса. Первый связан с возможно более точной оценкой полного сопротивления судна с заданной формой корпуса. Для этого используются расчётные методы и модельные испытания в опытовом бассейне. Второй вопрос – это поиск формы обводов с наименьшим сопротивлением

воды. Для решения этой задачи проводятся испытания серии моделей судов с разными обводами корпуса. Расчетные методы в этом случае дают только направление, в котором нужно менять форму корпуса, чтобы получить наименьшее сопротивление [1]. Гидромеханика пока еще не позволяет теоретически предсказать с требуемой для практики точностью кинематические и динамические характеристики потока вблизи поверхности судна и его сопротивление. Для количественных оценок этих характеристик используется модельные эксперименты в опытовых бассейнах.

Известные работы по проблемам обеспечения безопасности плавания судов в стесненных условиях (мелководье, подходной канал, акватория порта и т.п.) проводились на кафедре «Теория и проектирование корабля» Одесского национального морского университета под руководством профессора Ю.Л. Воробьева. В опытовом бассейне были выполнены систематические серийные испытания моделей судов по определению ходовой посадки и перемещений оконечностей судов при качке на мелководье и в подходных каналах, гидродинамического взаимодействия и кинематики судов партнеров при встречном движении. Экспериментальные исследования были поддержаны глубокими теоретическими разработками, в основу которых была положена новая версия метода сращиваемых асимптотических разложений (САР), специально разработанная профессором Ю.Л. Воробьевым для решения краевых задач судовой гидродинамики. Применение метода САР оказалось весьма плодотворным, с его помощью было решено большое число гидродинамических задач. Полученные теоретические и экспериментальные данные легли в основу серии нормативных и инструктивных документов по проектированию, строительству и технической эксплуатации подходных каналов и акваторий морских портов [2].

При разработке установок для освоения морских энергетических ресурсов (буровые платформы различных типов, подводные трубопроводы, терминалы и другие системы) испытания в опытовых бассейнах необходимы для решения многих прикладных проблем. К их числу относятся оценки воздействия экстремальных морских волн на терминалы, установленные в фиксированных точках [3]; определение волновых нагрузок на подводные трубопроводы в прибрежной зоне моря [4, 5], изучение пространственных колебаний плавучих установок и эффективности стабилизации вертикальных смещений при различной конструкции полупогружных платформ [6-10].

Как правило, из-за ограничения длины опытовых бассейнов в них формируется сложная система прямых и отраженных волн [11-13], которые необходимо разделить для правильной интерпретации результатов исследований.

Перечисленные проблемы, естественно, не исчерпывают все области проведения исследований в опытовых бассейнах. С усложнением решаемых

задач возрастают требования к характеристикам измерительной аппаратуры в части увеличения ее чувствительности, точности, быстродействия, возможности автоматизированной обработки данных измерений. Наиболее эффективным методом решения указанных задач является использование современной микроэлектроники. Один из возможных подходов в создании такой аппаратуры для обеспечения исследований в опытовых бассейнах был реализован в СевНТУ, а результаты выполненной работы представлены в настоящей статье.

Постановка задачи. Цифровая система для измерения параметров пространственных колебаний подвижных океанотехнических установок предназначена для определения характеристик их угловых и поступательных движений. Примерами таких подвижных объектов являются физические модели судов, глубоководных аппаратов, плавучих платформ и терминалов и другие объекты со сложным характером движения. Указанная цифровая система была создана в СевНТУ и в МГИ НАН Украины и содержит два волнографа, размещенные вдоль оси волнового бассейна на заданном расстоянии между ними и автономный измеритель пространственных колебаний (ИПК) исследуемой физической модели плавучего объекта.

Цифровые волнографы. В качестве чувствительных элементов волнографов использовались дифференциальные датчики давления фирмы «Motorola» типа MPX2010DP с динамическим диапазоном 10 кПа и чувствительностью 2,5 мВ/кПа. Прямые входы датчиков присоединены к жестким измерительным трубкам длиной 1 м. Выходы датчиков через операционные усилители типа INA-116P подключены к коммутатору аналого-цифрового преобразователя и далее через формирователь RS 232 – к порту ПЭВМ. Дифференциальный вход датчика воспринимает атмосферное давление, прямые входы датчиков подсоединены к измерительным трубкам, концы которых опускаются на заданную глубину и воспринимают гидростатическое и волновое давление воды. Волнографы такого типа созданы в МГИ НАН Украины д.т.н. Грековым Н.А.

При экспериментах используются два одинаковых измерителя, установленные вдоль направления распространения волны на фиксированном расстоянии. Фазовый сдвиг между показаниями этих датчиков используется для определения кажущейся длины волны и параметров прямой и отраженной волн. Изменение глубины погружения дифференциальных датчиков давления при фиксированном режиме работы волнопродуктора обеспечивает измерение волнового давления на различных глубинах. Это позволяет идентифицировать тип волновых возмущений.

Градуировка волнографов выполнена следующим способом. При отсутствии волнения приемный конец трубки датчика давления опускался на различную контролируруемую глубину h_i (от 50 до 500 мм через 50 мм). Одновременно считывался соответствующий выходной код N_i . Гидро-

статическое давление $p_i = \rho gh_i$ на каждой глубине сравнивалось с выходным кодом и, затем методом наименьших квадратов вычислялась градуировочная характеристика следующего вида $p = \alpha(N - N_0)$, где α, N_0 – коэффициент чувствительности и начальный код измерителя. Цифровые волнографы имеют высокую чувствительность – 0,3 Па, что эквивалентно 0,03 мм водяного столба. Стабильность метрологических характеристик этих измерителей была проверена повторными градуировками через интервалы времени, равные один месяц и при этом относительная нестабильность не превышала 1 %, что эквивалентно суммарной погрешности измерений в пределах 2 мм водяного столба.

Частота ω и амплитуда a_0 волновых возмущений, фазовый сдвиг γ между показаниями волнографов в бассейне, а также длины волн вычисляются в результате взаимной спектральной обработки показаний волнографов, расположенных друг от друга на расстоянии L_w . Основные соотношения спектральной обработки, приведены в таблице 1.

Амплитуда волны a_0 вычисляется на основании перепада давлений, регистрируемых каждым волнографом

$$p = \rho g a_0 \frac{\operatorname{ch} k(y + H)}{\operatorname{ch} kH}, \quad (1)$$

где p – амплитуда давления, вычисляемая на основании статистической обработки как $p = \sqrt{2R(0)}$; $R(0)$ – корреляционная функция при нулевом смещении (дисперсия);

$k = 2\pi / \lambda$ – волновое число;

H – глубина воды в бассейне, м;

y – ордината погружения трубок волнографа (отрицательное направление от среднего уровня воды вниз), м.

Таблица 1
Спектральные характеристики

Корреляционные функции	$R_{xx}(r\Delta t) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n \cdot x_{n+r};$ $R_{yy}(r\Delta t) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} y_n \cdot y_{n+r}$
Автоспектры	$G_{xk}(r\Delta t) = 2\Delta t [R_{x0} + 2 \sum_{r=1}^{m-1} R_{xr} \cos(\frac{\pi r k}{m}) + (-1)^k R_{xm}]$ $G_{yk}(r\Delta t) = 2\Delta t [R_{y0} + 2 \sum_{r=1}^{m-1} R_{yr} \cos(\frac{\pi r k}{m}) + (-1)^k R_{ym}]$

Продолжение табл. 1

Взаимные корреляционные функции	$R_{xy}(r\Delta t) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n \cdot y_{n+r}; \quad R_{yx}(r\Delta t) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} y_n \cdot x_{n+r}$
Взаимные спектры	$A_{xy}(r\Delta t) = 0,5[R_{xy}(r\Delta t) + R_{yx}(r\Delta t)],$ $B_{xy}(r\Delta t) = 0,5[R_{xy}(r\Delta t) - R_{yx}(r\Delta t)]$
Синхфазная составляющая взаимной спектральной плотности	$C_{xy}(r\Delta t) = 2\Delta t [A_0 + 2 \sum_{r=1}^{m-1} A_r \cos(\frac{\pi r k}{m}) + (-1)^k A_m]$
Квадратурная составляющая взаимной спектральной плотности	$Q_{xy}(r\Delta t) = 4\Delta t \sum_{r=1}^{m-1} B_r \sin(\frac{\pi r k}{m})$

Примечание: использованы следующие обозначения: x_i, y_i – отклонения от среднего показаний первого и второго волнографа; N – длина выборки; Δt – интервал дискретности, с; $r = 0 \dots m$ – число точек корреляционных функций; k – номер точки на спектограмме. Частота анализируемых колебаний равна $f_k = k / (2m \cdot \Delta t)$. Зависимости для определения параметров волн приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры волн

Фазовый сдвиг, рад	$\gamma(r_m) = \arctg\left(\frac{Q(r_m)}{C(r_m)}\right)$
Расчетная длина волны, м	$\lambda = \frac{2\pi L}{\gamma(r_m)}$
Период волны, с	$T = 1 / f_m$
Угловая частота волнения, рад/с	$\omega = 2\pi / T$

Для идентификации типа волновых возмущений были проведены измерения волнового давления на различных глубинах при фиксированном режиме работы волнопродуктора. При этом определялись величины экспериментального коэффициента ослабления амплитуды волнового давления K_c , которые затем сопоставлялись с величинами коэффициента ослабления K_c для линейных волн малой амплитуды.

$$K_c = \text{ch}[k(H + M_1)] / \text{ch}[k(H + M_2)], \quad (2)$$

где M_1 и M_2 – глубины погружения приемных концов трубок первого и второго волнографов.

На рис. 1 показан пример спектральных характеристик волновых возмущений в бассейне при проведении одного из экспериментов. Видно, что наблюдается выраженный максимум автоспектра G_k на частоте дискретности f_k , равной $1,05 \text{ с}^{-1}$, что соответствует периоду волнения $0,95 \text{ с}$. Пересечение максимума автоспектра с распределением длин волн дает величину расчетной длины волны λ , равной в данном случае $1,66 \text{ м}$.

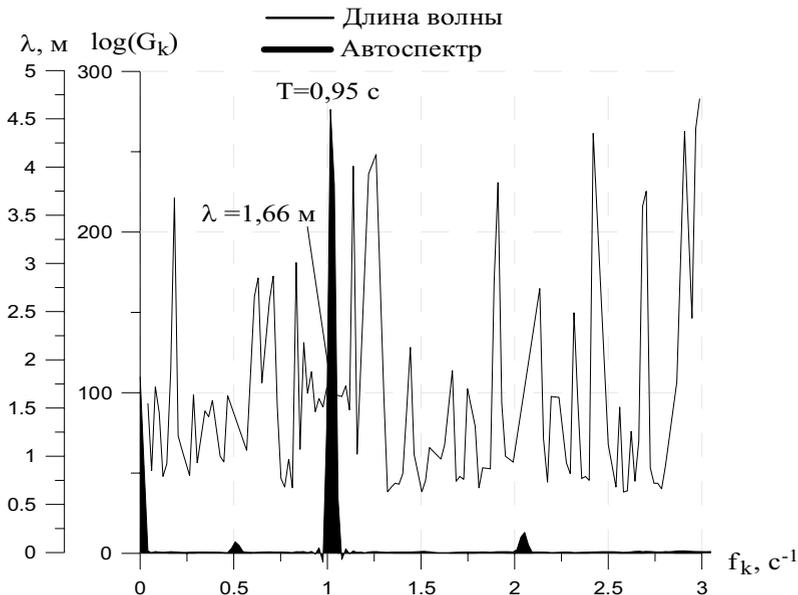


Рис. 1. Спектральные характеристики волнографов: сплошная зависимость – автоспектр, линия – фазовый спектр, пересчитанный в длину волны по соотношению $\lambda(f_k) = 2\pi L_w / \gamma(f_k)$

Сопоставление экспериментального коэффициента ослабления волнового давления K_e с вычисленной зависимостью K_c (см. рис. 2) показало их соответствие с уровнем достоверности 0,96. Это подтверждает справедливость использования линейной модели поверхностных волн для определения амплитуды волнения по соотношению (1), а также дает возможность использовать теорию волн малых амплитуд для оценок амплитуд прямой и отраженной волн.

Решетчатый волногаситель, установленный в опытовом бассейне СевНТУ, не полностью компенсирует энергию генерируемой волны и поэтому наблюдаются как прямые, так и отраженные волны. Это приводит к изменению длины результирующей волны и влияет на проводимые эксперименты.

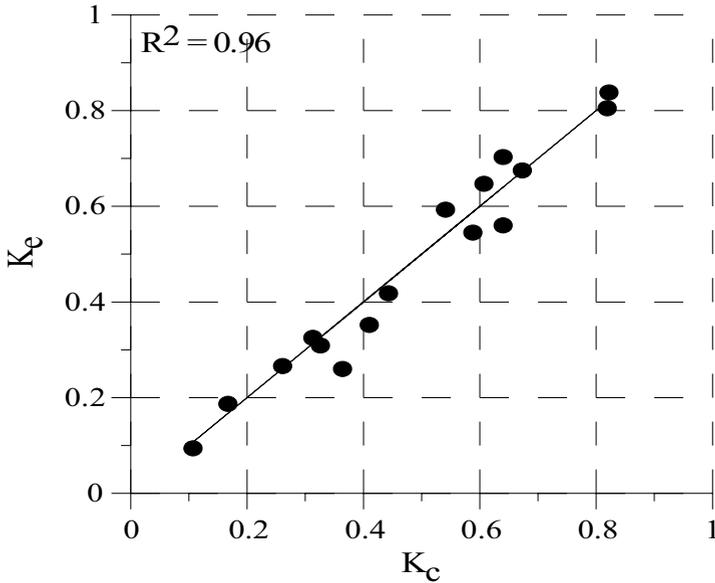


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных K_e и теоретических K_c величин коэффициентов ослабления амплитуды волнового давления

Волновое поле в опытовом бассейне описывается в приближении потенциальных волн, т.е. без учета вязкости воды. Потенциал скорости $\varphi(x, y, t)$ записывается следующим образом

$$\varphi(x, y, t) = \frac{V_0 ch[k(y + H)]}{ksh(kH)} \cos(\omega t - kx), \quad (3)$$

где oxy – прямоугольная система координат, оси которой показаны на рис.3;

$V_0 = aw$ – амплитуда вертикальной волновой скорости на поверхности воды;

a – амплитуда вертикальных смещений поверхности $\xi = a \sin(\omega t - kx)$.

Волновое число k определяется по дисперсионному соотношению $\omega^2 = g \cdot h \cdot th(kH)$ для линейных волн малой амплитуды.

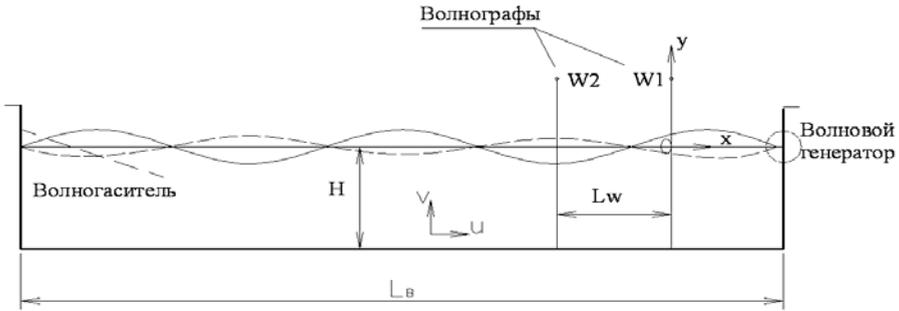


Рис.3. Схема расположения волнографов в волновом бассейне и используемая система координат x, y

Горизонтальная $U(x, y, t)$ и вертикальная $V(x, y, t)$ волновые скорости, а также давление $p(x, y, t)$ равны

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{V_0 \operatorname{ch}[k(H+y)]}{\operatorname{sh}(kH)} \sin(\omega t - kx), \\
 V &= \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{V_0 \operatorname{sh}[k(H+y)]}{\operatorname{sh}(kH)} \cos(\omega t - kx), \\
 p &= -\rho g y + \frac{\rho g a \operatorname{ch}[k(H+y)]}{\operatorname{ch}(kH)} \sin(\omega t - kx). \quad (4)
 \end{aligned}$$

В точке установке первого волнографа ($x = 0$) вертикальное смещение поверхности описывается соотношением $\xi_1 = a \sin(\omega t)$, второй волнограф регистрирует $\xi_2 = a \sin(\omega t - kL_w)$. Разность фаз между попаданиями первого и второго волнографов равна $\Delta \varphi_{12} = -kL_w$. Следовательно

$$\lambda = \frac{2\pi L_w}{\Delta \varphi_{12}}. \quad (5)$$

Таким образом, при отсутствии отраженной волны разность фаз между показаниями волнографов однозначно определяет длину волны в бассейне.

Вначале рассмотрим случай полного отражения прямой волны. При этом в точке отражения формируется свободная волна с волновым числом $k = 2\pi / \lambda$. В рассматриваемом случае полного отражения прямой волны, амплитуда отраженной волны равна a . Суммарное возвышение поверхности в общем виде записывается как

$$\xi = a \sin(\omega t - kx) + a \sin(\omega t + kx + \varphi),$$

где φ – некоторая неопределенная начальная фаза. Здесь учитывается распространение отраженной волны в положительном направлении оси ox .

Потенциал такой суммарной волны равен

$$\varphi = \frac{V_0 \operatorname{ch}[k(y+H)]}{ksh(kH)} \cos(\omega t - kx) + \frac{V_0 \operatorname{ch}[k(y+H)]}{ksh(kH)} \cos(\omega t + kx + \varphi). \quad (6)$$

Условие отражения $\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$ при $x = -L_0$, где L_0 – произвольное расстояние от первого волнографа до точки отражения. Обозначим для краткости записи

$$\frac{V_0 \operatorname{ch}[k(y+H)]}{sh(kH)} = \varphi_a, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \varphi_a \sin(\omega t - kx) - \varphi_a \sin(\omega t + kx + \varphi).$$

Для прямой волны $x = -L_0$, для отраженной $x = L_0$, поэтому

$$\frac{\partial \varphi(x = -L_0)}{\partial x} = \varphi_a \sin(\omega t + kL_0) - \varphi_a \sin(\omega t + kL_0 + \varphi) = 0.$$

$$\sin \omega t \cos kL_0 + \cos \omega t \sin kL_0 - \sin \omega t \cos(kL_0 - \varphi) - \cos \omega t \sin(kL_0 - \varphi) = 0$$

$$\sin \omega t [\cos kL_0 - \cos(kL_0 - \varphi)] + \cos \omega t [\sin kL_0 - \sin(kL_0 - \varphi)] = 0.$$

$$\sin \omega t \left[2 \sin \left(\frac{2kL_0 - \varphi}{2} \right) \sin \frac{\varphi}{2} \right] + \cos \omega t \left[2 \cos \left(\frac{2kL_0 - \varphi}{2} \right) \sin \frac{\varphi}{2} \right] = 0.$$

Таким образом, условие отражения выполняется при произвольном значении L_0 и при $\varphi = 0$. Возвышение поверхности для результирующей волны равно и не зависит от расстояния от любой точки бассейна до точки отражения

$$\xi = a \sin(\omega t - kx) + a \sin(\omega t + kx) = 2a \sin \omega t \cos kx. \quad (7)$$

Фазовый сдвиг между показаниями первого и второго волнографов равен нулю, что соответствует синхронным колебаниям поверхности в точках их установки, а волновое число k в данном случае характеризует расстояние между гребнями и ложбинами стоячих волн.

Основным режимом волнения в бассейне является суперпозиция прямой прогрессивной волны и частично отраженной волны, т.е.

$$\xi = a_n \sin(\omega t - kx) + a_0 \sin(\omega t + kx), \quad (8)$$

где a_n, a_0 – соответственно амплитуды прямой и отраженной волн.

Результирующую волну можно представить в виде

$$\xi = (a_n - a_0) \sin(\omega t - kx) + 2a_0 \sin \omega t \cos kx.$$

Сигнал первого волнографа ($x = 0$)

$$\xi_1 = (a_n - a_0) \sin \omega t + 2a_0 \sin \omega t = (a_n - a_0) \sin \omega t. \quad (9)$$

Сигнал второго волнографа

$$\begin{aligned}
 \xi_2 &= (a_n - a_0) \sin(\omega t + kL_w) + 2a_0 \sin \omega t \cos kL_w = \\
 &= (a_n - a_0) \sin \omega t \cos kL_w + (a_n - a_0) \cos \omega t \sin kL_w + 2a_0 \sin \omega t \cos kL_w = \\
 &= (a_n + a_0) \sin \omega t \cos kL_w + (a_n - a_0) \cos \omega t \sin kL_w = \\
 &= \sqrt{(a_n + a_0)^2 \cos^2 kL_w + (a_n - a_0)^2 \sin^2 kL_w} \sin(\omega t + \varphi),
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где $\varphi = a_n \operatorname{tg} \frac{(a_n - a_0) \sin kL_w}{(a_n + a_0) \cos kL_w}$.

Сдвиг фазы $\Delta\varphi$ между показаниями первого и второго волнографов равен

$$\Delta\varphi = \varphi = a_n \operatorname{tg} \left[\frac{(a_n + a_0)}{(a_n - a_0)} \operatorname{tg} kL_w \right]$$

или

$$\operatorname{tg} \Delta\varphi = \frac{a_n + a_0}{a_n - a_0} \operatorname{tg} kL_w, \quad a_n - a_0 = a_1 \frac{\operatorname{tg} kL_w}{\operatorname{tg} \Delta\varphi}, \quad a_n + a_0 = a_1 \frac{\operatorname{tg} \Delta\varphi}{\operatorname{tg} kL_w},$$

где a_1 – амплитуда сигнала первого волнографа.

Эта система имеет решение

$$a_n = 0.5a_1 \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \Delta\varphi}{\operatorname{tg} kL_w} \right), \quad a_0 = 0.5a_1 \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \Delta\varphi}{\operatorname{tg} kL_w} \right).
 \tag{11}$$

Если $\Delta\varphi = 0$, $a_n = a_0 = 0.5a_1$, что соответствует полному отражению волны при $\Delta\varphi = kL_w$, $a_n = a_1$, $a_0 = 0$, т.е. отраженная волна отсутствует. Величины a_1 и $\Delta\varphi$ определяют в результате выполнения спектрального анализа сигналов первого и второго волнографов.

Измеритель параметров пространственных колебаний. Как это отмечено выше, в состав цифровой измерительной системы кроме волнографов входит ИПК. Он состоит из трех микро акселерометров и гироскопов, характеристики которых приведены ниже.

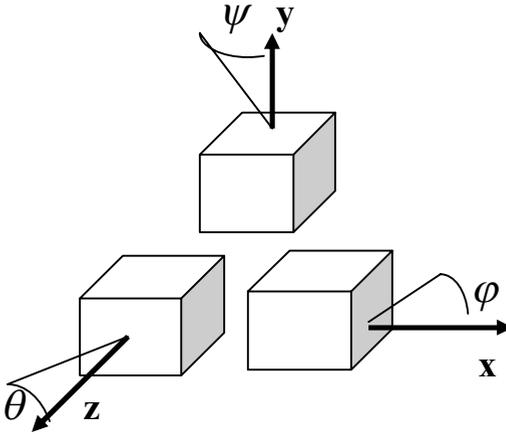
Акселерометр: Analog Devices ADXL335

измеряемый диапазон – минимум $\pm 3 \text{ g}$;
чувствительность – $270\text{-}330 \text{ mV/g}$;
типичная частота – 550 Hz по Z , 1600 Hz по X, Y ;
рабочее напряжение – $1,8\text{-}3,6 \text{ V}$;
ток питания – $350 \mu\text{A}$ при 3 V ;
время включения – 1 ms ;
размер – $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 1,45 \text{ mm}$.

Гироскоп: InvenSense IDG-500

измеряемый диапазон – минимум $\pm 110^\circ/sec.$;
чувствительность минимум – $2 mV/sec.$;
типичная частота – $140 Hz$;
рабочее напряжение – $2,7-3,3 V$;
ток питания – $7 mA$;
время включения максимум – $200 ms$;
размер – $4 mm \times 5 mm \times 1,2 mm$.

Оси акселерометров и гироскопов направлены вдоль осей системы координат подвижного объекта. Эти оси образуют правостороннюю декартову систему отсчета, в которой оси ox, oy, oz совпадают с произвольно выбранными осями подвижного объекта. Как правило, ось ox совпадает с продольной осью подвижного объекта, ось oy – с его условно вертикальной осью и ось oz направлена вдоль поперечной оси объекта. Рассматривается также некоторая неподвижная (базовая) система отсчета, измерительные оси которой ox_b и oz_b лежат в плоскости истинного горизонта, а ось oy_b направлена вертикально вверх и образует с этой плоскостью угол равный 90 градусов. В качестве такой системы может быть земная система отсчета, оси которой направлены вдоль географических осей; система координат, связанная с опытовым бассейном, либо произвольная фиксированная система отсчета, связанная с горизонтальными осями ox_b, oz_b и вертикальной осью oy_b . Для учета поступательных движений подвижного объекта используется скоростная система координат, в которой оси ox_v, oz_v, oy_v параллельны соответствующим осям неподвижной системы координат, а начало координат этой системы совпадает с началом координат системы отсчета подвижного объекта. Для связи систем координат ox_v, oz_v, oy_v и ox, oz, oy используются углы Эйлера-Крылова. Курсовой угол ψ (в некоторых случаях его называют углом рыскания) отсчитывается в горизонтальной плоскости между осью ox_v и горизонтальной проекцией оси ox ; угол дифферента θ (тангажа), характеризующий отклонение продольной оси подвижного объекта от горизонтальной плоскости и угол крена φ , характеризующий отклонение оси OZ от горизонтальной плоскости при вращении объекта относительно продольной оси. Эти углы определяются при помощи трехосевого гироскопа, что обеспечивает пересчет ускорений, измеренных в подвижной системе координат в ускорения в неподвижной (базовой) системе координат и, следовательно, в составляющие пространственных колебаний подвижного объекта (рис.4).



*Рис. 4. Общая схема выполнения измерений:
xuz – связанная с подвижным объектом правосторонняя декартова
система координат, ψ, φ, θ – углы Эйлера-Крылова*

Проекции единичных векторов системы координат $oxuz$ на оси скоростной системы координат $ox_v y_v z_v$ равны направляющим косинусам углов между осями ox, oy, oz и ox_v, oy_v, oz_v . Эти направляющие косинусы удобно представить в виде табл. 3.

Таблица 3

Направляющие косинусы

a_{jk}	x	y	z
x_v	a_{11}	a_{12}	a_{13}
y_v	a_{21}	a_{22}	a_{23}
z_v	a_{31}	a_{32}	a_{33}

Радиус вектор произвольной точки подвижного объекта можно представить в следующем виде: $p^{\rightarrow} = x \cdot i^{\rightarrow} + y \cdot j^{\rightarrow} + z \cdot k^{\rightarrow}$, где $i^{\rightarrow}, j^{\rightarrow}, k^{\rightarrow}$ единичные векторы (орты) осей ox, oy, oz . С учетом этого векторного равенства можно записать

$$\begin{aligned}
 x_v &= a_{11} \cdot x + a_{12} \cdot y + a_{13} \cdot z, \\
 y_v &= a_{21} \cdot x + a_{22} \cdot y + a_{23} \cdot z, \\
 z_v &= a_{31} \cdot x + a_{32} \cdot y + a_{33} \cdot z.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Произвольное вращательное движение подвижного объекта характеризуется тремя независимыми параметрами. Поэтому между девятью направляющими косинусами должно существовать шесть независимых соотношений, которые можно найти из анализа скалярных и векторных произведений единичных векторов. Для строчек таблицы направляющих косинусов находим

$$\begin{aligned}
 a_{11}^2 + a_{12}^2 + a_{13}^2 &= 1, \\
 a_{21}^2 + a_{22}^2 + a_{23}^2 &= 1, \\
 a_{31}^2 + a_{32}^2 + a_{33}^2 &= 1, \\
 a_{11} \cdot a_{21} + a_{12} \cdot a_{22} + a_{13} \cdot a_{23} &= 0, \\
 a_{11} \cdot a_{31} + a_{12} \cdot a_{32} + a_{13} \cdot a_{33} &= 0, \\
 a_{21} \cdot a_{31} + a_{22} \cdot a_{32} + a_{23} \cdot a_{33} &= 0.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Если для связи систем координат $oxuz$ и $ox_vy_vz_v$ использовать введенные углы Эйлера-Крылова и один из известных методов определения направляющих косинусов (соотношения сферической тригонометрии, матричный метод последовательных вращений, кватернионы [14]), то, опуская промежуточные вычисления, можно получить представленную ниже таблицу направляющих косинусов (табл. 4).

Таблица 4

Направляющие косинусы

a_{ij}	x	y	z
x_v	$a_{11} = \cos \psi \cdot \cos \theta$	$a_{12} = \sin \psi \cdot \sin \varphi - \cos \psi \cdot \cos \varphi \cdot \sin \theta$	$a_{13} = \sin \psi \cdot \cos \varphi + \cos \psi \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta$
y_v	$a_{21} = \sin \theta$	$a_{22} = \cos \varphi \cdot \cos \theta$	$a_{23} = -\sin \varphi \cdot \cos \theta$
z_v	$a_{31} = -\sin \psi \cdot \cos \theta$	$a_{32} = \cos \psi \cdot \sin \varphi + \sin \psi \cdot \cos \varphi \cdot \sin \theta$	$a_{33} = \cos \psi \cdot \cos \varphi - \sin \psi \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta$

При расчетах ускорений в скоростной системе координат необходимо учитывать, что сигналы гироскопов пропорциональны производным от соответствующих углов, а углы отклонений по крену, дифференту и курсу являются малыми величинами, что позволяет использовать приближение вида $\cos \alpha = 1$, $\sin \alpha = \alpha$.

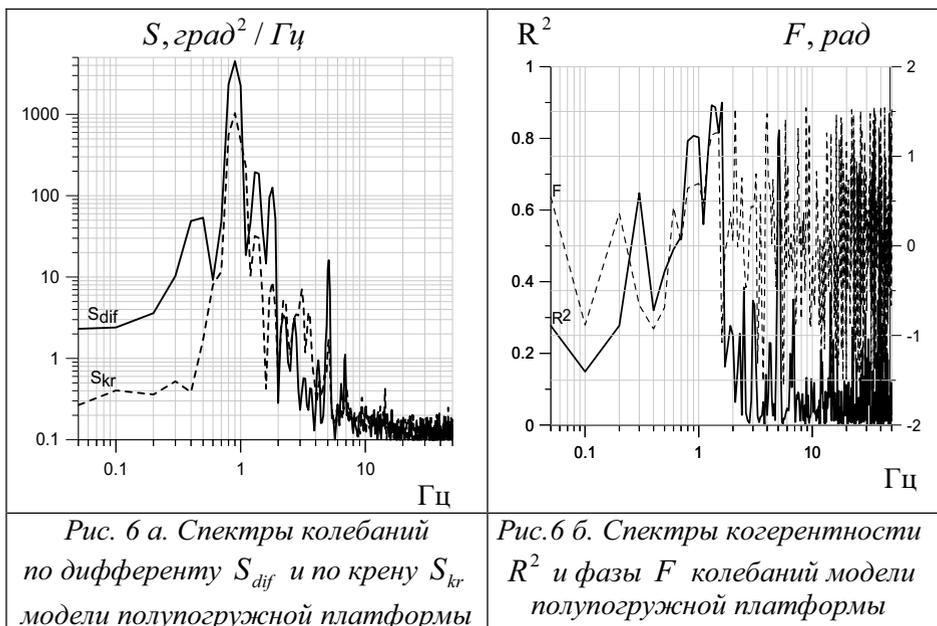
Внешний вид ИПК приведен на рис.5. В этом устройстве частота измерений равна 100 Гц, объем памяти позволяет непрерывно записывать данные в течение примерно двух суток.



Рис. 5. Внешний вид ИПК

Рассмотренная цифровая система была использована для исследований колебаний модели полупогружной платформы в опытовом бассейне севНТУ с целью верификации разработанной модели таких колебаний с учетом нелинейных эффектов [10]. На рис. 6. показаны спектры колебаний углов дифферента и крена модели при ее минимальном заглублении, а также спектры когерентности и фазы этих колебаний. Основной пик спектра соответствует периоду волн в бассейне (около 0,95 с). Наряду с ним на спектре проявились максимумы на комбинационных частотах, которые возбуждаются из-за нелинейных эффектов колебаний платформы. Колебания по крену и дифференту на основной частоте волнения имеют высокую когерентность, которая резко уменьшается с увеличением частоты. Фазовый сдвиг между колебаниями дифферента и крена близок к 90 градусам, т.е. такие колебания находятся в квадратуре. Следует отметить высокое пространственное разрешение спектральных характеристик по частоте, обеспечивающее получение данных при уменьшении основного максимума спектра на четыре порядка.

Градуировка акселерометров и гироскопов выполняется при помощи специального маятника, к которому крепится корпус ИПК с возможностью его ориентации в различной плоскости. При градуировках маятник отклоняют на различный начальный угол, который при прочих фиксированных параметрах определяет характеристики колебания скорости и ускорения в плоскости движений ИПК при его различной ориентации относительно плоскости колебаний маятника.



Выводы

1. Особенностью созданной в СевНТУ цифровой системы для исследований океанотехнических систем в волновых бассейнах является широкое использование современной микроэлектроники, что обеспечивает ее качественные характеристики по точности, чувствительности и разрешающей способности при использовании спектральной обработки данных.

2. В цифровом измерителе пространственных колебаний (ИПК) применена полная схема измерения пространственных угловых и поступательных колебаний подвижного объекта.

3. Созданная цифровая измерительная система используется в СевНТУ для лабораторных исследований пространственных колебаний физических моделей плавучих буровых платформ различной конфигурации, в том числе платформ для глубоководных постановок.

4. Для градуировки и поверки измерительных каналов цифрового устройства создано специальное приспособление в виде физического маятника, частота собственных колебаний которого совпадает с частотой свободных волн в опытовом бассейне СевНТУ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Готман А.Ш. История определения сопротивления воды движению судов. <http://shipdesign.ru/Gotman/MicHist.html>.*
2. *<http://www.osmu.odessa.ua/builder.php?id=119>*
3. *Кушинир В.М., Ларин М.К. Жемойдо Ю.Г. Гидродинамические нагрузки на морской терминал: численное моделирование и экспериментальные данные. Вестник СевНТУ. – Севастополь: СевНТУ, 2007. – Вып. 80. – С. 94-99.*
4. *Кушинир В.М., Греков Н.А., Морозов А.Н., Федоров С. В., Строганов А.С. Воздействие волновых течений на подводный трубопровод: физические лабораторные эксперименты // Вестник СевГТУ: Сб. научн. тр. – Севастополь, 2004. – № 55. – С. 197-207.*
5. *Кушинир В.М., Федоров С.В Экстремальные механические нагрузки на магистральный трубопровод вдоль Кавказского побережья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. научн. трудов. – Севастополь, 2001. – № 2. – С.220-228.*
6. *Морева И.Н., Парфеньев А.И., Кушинир В.М. Нелинейные колебания полупогружных морских платформ на волнении // Сборник докладов VI Международной научной конференции аспирантов и студентов «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов». – Донецк: ДонНТУ, ДонНУ, 2007. – Т. 2. – С. 218-219.*
7. *Морева И.Н., Парфеньев А.И., Ожиганов Ю.Г. Модельные исследования характеристик моделей морских судов и сооружений в опытном бассейне // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП. – 2007. – Вып. 2 (21). – С. 145- 151.*
8. *Морева И.Н., Парфеньев А.И., Кушинир В.М., Ожиганов Ю.Г. Определение коэффициентов волнового демпфирования морских полупогружных платформ методом свободных затухающих колебаний // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП. – 2007. – Вып. 4(24). – С. 202-206.*
9. *Морева И.Н. Особенности колебаний морских полупогружных платформ при воздействии штормовых волн // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – Севастополь, 2006. – Вып. 3(19). – С. 152-161.*
10. *Морева І.М. Гідродинаміка просторових коливань напівзанурюваної платформи у штормових умовах / І.М. Морева. – Дисертація канд. техніч. наук. Од. нац. морський університет. – Одеса, 2009. –123 с.*
11. *Морева И.Н., Федоров С.В., Ожиганов Ю.Г., Кушинир В.М. Исследования волновых возмущений в опытном бассейне // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП. – 2006. – Вып. 2(18). – С. 217-226.*

12. Морева И.Н., Олейник В.Г., Кушнир В.М. Исследования волновых возмущений в опытовом бассейне СевГТУ // *Материалы I международной научно-практической конференции «Наука и технологии: шаг в будущее-2006»*. – Белгород: Руснаучкнига, 2006. – Т. 13. Технические науки.– С. 60-62.
13. Криворчук Л.И., Морева И.Н., Дерябин И.В. Исследование волновых возмущений при различных режимах работы волнопродуктора в опытовом бассейне СевНТУ // *Materiały V międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Dynamika naukowych badań-2009»*. – Vol. 10. Fizyka. – *Przemysł: Nauka i studia*, 2009. – S.57-60.
14. Павловский М.А. *Теория гироскопов*. – К.: Вища школа, 1998. – 303 с.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

**ЦИФРОВА СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ
ОКЕАНОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В ХВИЛЬОВИХ БАСЕЙ-
НАХ**

Дано опис цифрової системи для проведення лабораторних досліджень просторових хвильових коливань плавучих океанотехнічних систем (бурильних платформ, судів, терміналів). До складу цієї системи входять цифрові хвильові вимірювачі та вимірник просторових коливань рухомого об'єкту. Приведені результати використання цифрової системи в хвильовому басейні СевНТУ.

Ключові слова: хвильовий басейн, хвильовий вимірювач, вимірювач просторових коливань

**DIGITAL SYSTEM FOR RESEARCHES
OF THE OCEAN ENGINEERING SYSTEMS IN WAVES
POOLS**

Description of the digital system is given for the carried out of the laboratory researches of spatial waves fluctuations of the floating ocean engineering. In the complement of this system enter digital wave meters and measuring device of spatial fluctuations of mobile object. The results of the use of the digital system are resulted in the wave SebNTU pool.

Keywords: wave pool, wave meter, spatial fluctuation meter

УДК 629.5 Е30

Г.В. Егоров

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ТАНКЕРОВ СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ

Приведены результаты анализа грузопотоков нефти и нефтепродуктов для Европейской части России с определением основных видов наливных грузов, пунктов погрузки, перегрузки и выгрузки, коммерческих особенностей и продолжительности рейсов, необходимых для решения внешней задачи проектирования нефтеналивных судов смешанного плавания. Показана необходимость строительства новых судов.

Ключевые слова: суда смешанного река-море плавания, класс судна, танкер, прогноз, перевозки нефтепродуктов, внутренний водный транспорт.

Наведено результати аналізу вантажопотоків нафти та нафтопродуктів для Європейської частини Росії з визначенням основних типів наливних вантажів, пунктів завантаження, перевантаження та вивантаження, комерційних особливостей та тривалості рейсів, які є необхідними для вирішення зовнішнього завдання проектування нафтоналивних суден змішаного плавання. Показано необхідність будівництва нових суден.

Ключові слова: судна змішаного ріка-море плавання, клас судна, танкер, прогноз, перевезення нафтопродуктів, внутрішній водний транспорт.

Results of the analysis of freight traffics of oil and petroleum products for the European part of Russia are given with definition of the basic kinds of liquid cargoes, points of loading, reloading and unloading, commercial features and durations of voyages necessary for the decision of an external task of designing of mixed navigation oil tankers. Necessity of building of new vessels is shown.

Keywords: mixed the river-sea navigation vessels, class of the vessel, tanker, prediction, transportations of petroleum products, internal waterways transport.

Постановка проблемы. История создания отечественных танкеров смешанного плавания началась еще до Великой Отечественной войны, с попытки оптимизировать вывоз бакинской нефти, которая тогда осуществлялась с двумя перевалками – сначала на Астраханском морском рейде с морских танкеров на рейдовые лихтера (было создано особое рейдовое пароходство), затем в самой Астрахани – с лихтеров на речные баржи.

Поэтому в середине 30-х годов прошлого столетия инженер А.Ф. Пустошкин предложил создать танкер для бесперевалочной перевозки нефти от Баку до Астрахани. Идея широко дискутировалась, в прениях принимали участие «отцы-основатели» советской кораблестроительной науки – академики А.Н. Крылов, Ю.А. Шиманский, проф. П.Ф. Папкович.

Первый мелкосидящий (с осадкой 4,0 м) танкер, предназначенный для перевозки нефти и нефтепродуктов из морских портов Каспия на Астрахань, без перегрузки на рейде, был построен в 1954 году.

За счет постройки серии таких судов типа «Олег Кошевой» (и их второй серии – типа «Инженер А. Пустошкин») к концу 50-х годов удалось ликвидировать рейдовые перевалки на Астраханском и Красноводском рейдах. Интересно отметить, что к постройке был принят только шестой вариант проекта, что наглядно характеризует накал дискуссий по обоснованию характеристик судов нового типа.

Однако именно эти танкеры оказались не столь эффективными как суда смешанного плавания, так как не выбирали в реке (где глубина тогда обеспечивала осадки около 3,30 м) значительную часть своей грузоподъемности¹.

Поэтому следующий шаг был предпринят на основе речных танкеров классов «М» и «О» Речного Регистра проектов 558 типа «Волго-нефть» и 576Т типа «КамГЭС», которые были допущены к морской эксплуатации с установлением ограничений по районам, сезонам и допускаемой высоте волны.

Так, в 1962 году были осуществлены опытные перевозки нефтепродуктов на танкере «Великий» проекта 558 на Черном море, с 1965 года суда этого же проекта начали работу на порт Махачкала, а в 1971 году танкер «Волго-нефть-55» осуществил бесперевалочную перевозку сырой нефти из Актау в Волгоград. В итоге, к 1990 году объем перевозок нефти и нефтепродуктов речным транспортом СССР составлял 33 млн. тонн.

Понятно, что к настоящему времени отечественный флот танкеров смешанного река-море плавания, построенных в советское время, физически и морально устарел. Например, по состоянию на август 2010 года средний возраст основных для европейской части 124 танкеров типа «Волго-нефть» составлял по проекту 558/550 – 42,4 года, по проекту 1577/550А – 35,3 года. Из них 18 судов имели оценку «негодное» (14,5 %). Главной проблемой этих проектов является наличие высоты второго дна, не удовлетворяющей требованиям МК МАРПОЛ [6].

Целью статьи является исследование экономических предпосылок строительства нового поколения танкеров смешанного плавания для Европейской части России на основе анализа грузопотоков нефти и нефтепродуктов с определением основных видов наливных грузов, пунктов

¹ Ситуация весьма близка к сегодняшней. Для справки – в СССР практически все участки ЕГС европейской части обеспечивали осадку 4,0 м, лимитирующие участки – 3,6 м

погрузки, перегрузки и выгрузки, коммерческих особенностей и продолжительности рейсов. Такая информация необходима для решения внешней задачи проектирования (определения основных характеристик и требуемого количества флота) нефтеналивных судов смешанного плавания.

Изложение основного материала. Динамика перевозок грузов внутренним водным транспортом по данным ЗАО «Ленгипроречтранс» [3], начиная с 2000 г., представлена в табл. 1.

В 2000 г. впервые за десятилетие в экономике страны наметился явный перелом, что нашло свое отражение на показателях работы внутреннего водного транспорта, который в 2000 и 2001 годах лидировал по темпам роста (соответственно 113,6 и 106,2 % к уровню предыдущего года).

Таблица 1
Объем перевозок грузов внутренним водным транспортом России
за 2000-2010 гг., млн. тонн

Род груза	Год									
	2000	2001	2002	2003	2004	2006	2007	2008	2009	2010
Всего	116,8	124,0	100,2	100,1	112,9	139,2	152,4	151,0	97,6	104,9
Нефть и нефтепродукты	11,8	13,4	14,5	19,0	18,8	13,9	9,75	9,8	11,7	

За период с 2000 по 2007 гг. объем этих перевозок постоянно увеличивался. В целом рост составил 1,3 раза. Одновременно с этим объемы перевозки нефти и нефтепродуктов снизились на 17 %.

Согласно статистике Минтранса, объем перевозок речным транспортом рос до 2009 года. В кризисном 2009 году произошло заметное падение объемов в основном за счет уменьшения перевозок минерально-строительных грузов при заметном росте перевозок нефтегрузов (на 19,3 %). В 2010 году объем перевозок составил 104,9 млн. тонн (+7,4 % к уровню 2009 года).

В целом, объемы перевозок нефтеналивных грузов внутренним водным транспортом на перспективу (с учетом строительства вторых ниток шлюзов ВДСК) ЗАО «Ленгипроречтранс» оценивает следующим образом: 2015 г. – 12,5 млн. т, 2020 г. – 13,0 млн. т, 2025 г. – 15 млн. т (ожидаемый рост в сравнении с 2008 годом – в 1,5 раза). Минимальный прогноз (т.е. без введения вторых ниток шлюзов ВДСК): 2015 г. – 11,6 млн. т, 2020 г. – 12,5 млн. т, 2025 г. – 13 млн. т (рост в сравнении с 2008 годом – в 1,3 раза). Следует отметить, что уже в 2009 году был достигнут объем в 11,7 млн. тонн нефтегрузов. **Если рост перевозок пойдет такими темпами, то главной проблемой будет пропускная способность шлюзов.**

Сами нефтегрузы принадлежат компаниям, указанным в табл. 2.

Танкеры и барже-буксирные составы (ББС) смешанного река-море плавания с классами О-ПР, М-ПР и выше используются (или могут использоваться) на следующих смешенного река-море перевозках в европейской части:

Таблиця 2

*Основные грузовладельцы, представляющие интерес
для подготовки бизнес-планов по созданию нового поколения
танкеров смешанного река-море плавания*

Номер	Наименование
1	Роснефть
2	Лукойл
3	ТНК-ВР
4	Сургутнефтегаз
5	Газпромнефть
6	Татнефть
7	Башнефть
8	Русснефть

– на южном направлении (Татьянка, Самара, Саратов, Кашпир, Октябрьск и др. речные порты – РПК2 рейда порта Кавказ);
– на северо-западном направлении (Кстово, Нижние Муллы, Уфа, Нижнекамск и др. речные порты – РПК и российские порты Финского залива);
– на северном направлении (речные порты – порты Белого моря).

Основные НПЗ, продукцию которых перевозят танкеры смешанного плавания, указаны на рис. 1.

Общий объем рейдовой перегрузки нефтепродуктов через рейды портов Кавказ и Керчь в 2007 году составил 4,2 млн. тонн.

В 2007 году танкерами смешанного река-море плавания было доставлено на рейдовые перевалки в Финском заливе 3,6 млн. тонн нефтепродуктов:

- 2,4 млн. тонн (ЗАО «Ин-Транзит», Петербургский нефтяной терминал (ПНТ) [13];
- 0,6 млн. тонн («В.Ф. Танкер», Петербургский нефтяной терминал, мазут марки М-100);
- 0,6 млн. тонн («В.Ф. Танкер», порт Высоцк).

По данным агентства Argus, в апреле – июле 2007 г. на экспорт было отгружено 3,9 млн. т нефтепродуктов (т.е. за весь сезон около 7,8 млн. тонн груза, что совпадает с вышеприведенными данными).

По информации информационного агентства «PortNews» [17], в навигационный период 2008 г. совокупный объем транспортировки нефтеналивных грузов с российских НПЗ³ по внутренним водным путям в направлении южных портов достиг почти 4 млн. т.

² РПК – распределительно-перевалочный комплекс

³ НПЗ – нефтеперегонный завод



Рис. 1. Основные НПЗ, продукцию которых перевозят на танкерах смешанного река-море плавания

В докладе Эльвиры Чукмаровой (агентство Argus) отмечалось, что в южном направлении в 2010 году было перевезено 4,73 млн. тонн нефтепродуктов, в 2011 году – 4,65 млн. тонн.

В 2008 году объем перевезенных в северо-западном направлении нефтегруза увеличился до 4,1 млн. тонн:

- 3,0 млн. тонн (ЗАО «Ин-Транзит», Петербургский нефтяной терминал);
- 1,1 млн. тонн («В.Ф. Танкер», порт Высоцк и Петербургский нефтяной терминал).

Таким образом, в 2008 г. совокупный объем транспортировки нефтеналивных грузов с российских НПЗ по внутренним водным путям в северо-западном и южном направлениях составил около 8,1 млн. т.

Таким образом, основную часть перевозок нефти и нефтепродуктов водным транспортом (9,8 млн. т в 2008 и 2010 годах, 8,7 млн. т в 2009 году, 10,1 млн. т в 2011 году) составляют перевозки танкерами смешанного река-море плавания с внутренних НПЗ на порты Финского залива и порт Кавказ (82,6 % по статистике 2008 года).

Интересно отметить, что, несмотря на кризис, за 2009 год объем перевозок грузов на судах смешанного река-море плавания увеличился на 26,4 % (15,6 млн. т против 12,3 млн. т в 2008 году), при этом **танкеры смешанного плавания перевезли уже 8,7 млн. т нефти и ее производных.**

В качестве примера можно привести данные по судоходной компании «В.Ф. Танкер», входящей в состав международной транспортной группы Universal Cargo Logistics Holding.

С 2006 г. «В.Ф. Танкер» осуществляет перевозки грузов ОАО «Лукойл» на следующих направлениях (см. рис. 2):

- перевозки мазута М-100 на линии «Кстово (Нижегороднефтеоргсинтез) – Высоцк (РПК Высоцк-2)»;
- перевозки мазута М-100 на линии «Кстово (Нижегороднефтеоргсинтез) – С.-Петербург (Петербургский нефтяной терминал)»;
- перевозки мазута М-100 на линии «Н. Муллы (Пермьнефтеоргсинтез) – С.-Петербург (Петербургский нефтяной терминал)».

Всего за 2006-2009 г. «В.Ф. Танкер» перевез 4,4 млн. т мазута М-100 (в среднем, по 1,1 млн. т в год), динамика перевозок по годам видна из табл. 3. Предполагается увеличение объема перевозок до 1,3 млн. тонн в год.

Таблица 3

Статистика перевозки мазута судоходной компанией «В.Ф. Танкер»

Основные маршруты доставки	Груз	Грузы ОАО «Лукойл», тыс. т				Итого за 2006-2009 гг., тыс. т
		2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	
Кстово-Высоцк	М-100	545,2	590,7	458,7	533,7	2 128,3
Кстово-ПНТ	М-100	299,4	235,1	291,0	319,3	1 144,8
Н. Муллы – ПНТ / Высоцк	М-100	255,2	315,7	288,5	246,8	1 106,2
Прочие маршруты доставки	М-100	0,0	0,0	22,3	0,0	22,3
<i>Итого</i>		<i>1 099,8</i>	<i>1 141,5</i>	<i>1 060,5</i>	<i>1 099,8</i>	<i>4 401,6</i>

По данным агентства Argus, мазут в 2010 году (2011 году) составлял 63 % (61 %), вакуумный газойль – 27 % (32 %), дизельное топливо – 9% (5 %), прочие виды нефтепродуктов – 1 % (2 %).

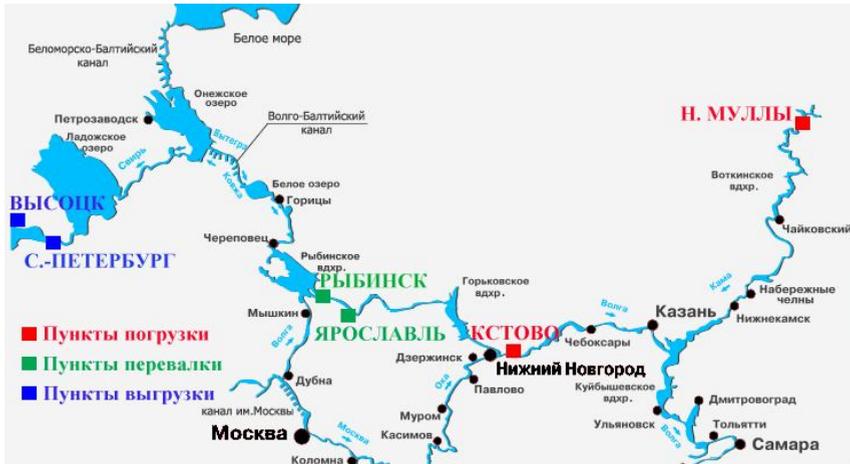


Рис. 2. Схема транспортировки нефтепродуктов «В.Ф. Танкер»
Пункты погрузки – Кстово и Н. Муллы. Пункты перевалки – Рыбинск
и Ярославль. Пункты выгрузки – Высоцк и С.-Петербург (ПНТ)

Рынок перевозок нефтепродуктов речным транспортом в России является **немонополизированным и конкурентным**. В настоящее время перевозки нефти и нефтепродуктов на танкерах смешанного река-море плавания осуществляют судоходные компании (в скобках указан объем перевезенных нефтегрузов в 2009 году):

- «БашВолготанкер» (4,4 млн. тонн);
- «В.Ф. Танкер» (2,1 млн. тонн);
- «Прайм Шиппинг» (0,8 млн. тонн);
- «Транспетрочарт» (0,7 млн. тонн);
- «Палмали»;
- компании, приобретающие флот «Волготанкера» («Волготранс», «Волготранссервис», «Ярославия»);
- «Навигатор»;
- «Транслайн»;
- «Адмирал»;
- «Петропром»;
- «Инвестфлот Шиппинг» и др.

В перспективе ожидается некоторое увеличение объемов предъявления грузов к перевозке. Об этом свидетельствует ряд косвенных факторов, таких, например, как рост объемов производства нефтепродуктов в России.

Как видно из табл. 4 и 5, среднегодовые темпы прироста объемов производства нефтепродуктов в РФ за 2005-2008 годы (по данным Федеральной службы государственной статистики) составили 5,1 %.

Интересно отметить, что в 2005-2006 годах специалисты компании «Волготанкер АМС» пришли к выводу, что в ближайшие годы следует рассчитывать на стабилизацию рынка мазута.

Таблиця 4

*Физические объемы производства
важнейших нефтепродуктов в РФ, млн. т*

Нефтепродукт	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.
Мазут топочный, млн. т	53,6	56,7	59,3	62,7	63,9
Топливо дизельное, млн. т	55,4	60,0	64,2	66,3	68,9
<i>Итого, млн.т</i>	<i>109,0</i>	<i>116,7</i>	<i>123,5</i>	<i>129,0</i>	<i>132,8</i>

Таблиця 5

Темпы роста производства важнейших нефтепродуктов в РФ, %

Показатели	Темп прироста, 2005 г. к 2004 г., %	Темп прироста, 2006 г. к 2005 г., %	Темп прироста, 2007 г. к 2006 г., %	Темп прироста, 2008 г. к 2007 г., %	Среднегодовые темпы прироста за 2005-2008 гг. по сравнению с уров- нем 2004 г., %
Физические объемы производства нефтепродуктов в РФ	+ 7,1	+ 5,8	+ 4,4	+ 2,9	+ 5,1

Например, на северо-западном направлении перевозки нефтепродуктов (в основном мазут) достигали тогда 5 млн. тонн в год. Перспективы дальнейшего развития этих перевозок по Волго-Балтийскому водному пути неоднозначны. С одной стороны, материалы нефтяной отрасли свидетельствуют о тенденции углубления переработки сырья на нефтезаводах, сокращении производства мазута [14], а с другой стороны реконструкция заводов отстает от планируемых темпов и экспорт мазута из России де-факто осуществляется в значительных объемах.

На основании вышеизложенного, а также с учетом ограниченной пропускной способности шлюзов ВБВП и необходимостью освоения транзитного грузопотока межнационального транспортного коридора (МТК) «Север-Юг», объем перевозок нефтепродуктов **по северо-западному направлению** (Кстово, Нижние Муллы, Уфа, Нижнекамск и др. речные порты – российские порты Финского залива) **принят на перспективу 2015-2025 гг. 4,0 млн. тонн** (оценка специалистов «В.Ф. Танкер» выше – **5,3 млн. тонн** к 2015-2017 годам, фактически в 2010 году – 5,02 млн. тонн, в 2011 году – 5,27 млн. тонн).

Грузопотоки южного направления (т.е. проходящие по Волго-Донскому судоходному пути) формируются с двух направлений, а именно: с Волги и с Каспия.

В навигацию 2008 г. было перевезено около 2 млн. тонн нефтепродуктов в направлении средиземноморских стран и около 1,9 млн. тонн в страны Придунайского бассейна (Болгария, Румыния и др.).

Можно предположить, что в период 2015-2020 гг. возрастет потребность в нефтепродуктов не только южных европейских стран, но и стран Северо-Западной Европы.

По мнению специалистов ЗАО «Ленгипроречтрнас», это связано с тем, что в перспективе уменьшится добыча нефти в Северном море и для ее возмещения на рынки стран Северо-Западной Европы будет поступать нефтепродукты с Прикаспийского региона, как наиболее привлекательного и перспективного в части запасов нефти и объемов ее добычи. Ожидается, что спрос на нефть в странах Южной Европы будет возрастать более высокими темпами (в среднем 10 % в год), а в странах Придунайского бассейна (в среднем до 12 % в год).

Объем перевозок нефтепродуктов по южному направлению (Татьянка, Самара, Саратов, Кашпир, Октябрьск и др. речные порты – РПК⁴ рейда порта Кавказ, а также каспийский транзит) принят на перспективу 2015-2025 гг. 6,75-10,0 млн. тонн (см. табл. 6). Пока фактический объем меньше – в 2010 году 4,73 млн. тонн, в 2011 году – 4,65 млн. тонн.

Таблица 6

Перспективный грузопоток южного направления, тыс. тонн

Наименование груза	Отчет		Прогноз		
	2007 г.	2008 г.	2015 г.	2020 г.	2025 г.
Всего	21356	19054	24890	29470	50000
Нефть и нефтепродукты	4082	4092	6750	8100	10000

Северное направление активно использовалось с августа 1970 года, когда судно «Нефтерудовоз-3» совершило первый рейс в Заполярье и, пройдя сотни километров по Волге, Беломоро-Балтийскому каналу (ББК) и Белому морю, пришвартовался у причалов города Кандалакши в Мурманской области. Обрато на Волгу эти суда перевозили рудный концентрат. В 2003 году компания «Волготанкер АМС» осуществила транспортировку по Беломоро-Балтийскому каналу 220 тысяч тонн мазута в Онежский залив Белого моря, где он был перегружен на морские танкеры и отправлен в Европу. Но уже в 2004 году перевозка нефтепродуктов по ББК не осуществлялось, так как в сентябре 2003 года произошел аварийный разлив мазута во время перевалки на рейде в Онежском заливе [2].

⁴ РПК – распределительно-перевалочный комплекс

Северное направление не задействовано до сих пор. Во многом, это связано с отсутствием двухкорпусных танкеров смешанного река-море плавания соответствующих габаритов. Следует иметь в виду, что суда «ББК макс» класса будут иметь меньшую грузоподъемность (практически в два раза), чем суда «Волго-Дон макс» класса и поэтому бизнес будет их строить в последнюю очередь (по сути, только после того, как северо-западное и южное направления исчерпают свою пропускную способность).

В дополнение к перечисленным выше классическим схемам перевозки нефти и нефтепродуктов могут осуществлять на судах смешанного река-море плавания по следующим схемам:

– танкерами и барже-буксирными составами (ББС) ограниченного района плавания с классами R3-RSN (М-СП), R2-RSN, R2, R1 для перевозки с устьевых речных портов черноморско-азовского бассейна, мелководных морских портов Азовского моря, морских портов Черного и Балтийского моря к европейским и турецким портам без перевалки (круглогодично), причем накопление грузов в портах осуществляется подачей железнодорожным и автомобильным транспортом, а также речными судами;

– танкерами и барже-буксирными составами (ББС) ограниченного района плавания с классами R3-RSN (М-СП), R2-RSN, R2, R1 в Каспийском море (круглогодично) или из портов Каспия на порты Европы через внутренние водные пути России (в весенне-летний сезон);

– танкерами и ББС смешанного река-море плавания с классами R3-RSN (М-СП) и выше для перевозки грузов с речных российских и украинских портов, портов Дуная к средиземноморским и турецким портам без перевалки, а также с речных российских портов и НПЗ в порты Дуная без перевалки (в весенне-летний сезон);

– танкерами и ББС смешанного плавания с классами М-ПР и выше для перевозки грузов с речных российских портов в порты Дуная (в весенне-летний сезон).

Принципиально важно в дополнительных схемах является возможность эксплуатации судов зимой, что существенно влияет на экономику и окупаемость вновь построенных судов.

Морские порты, где может осуществляться (теоретически) отгрузка нефтепродуктов на танкеры смешанного река-море плавания в осенне-зимний период, приведены в табл. 7 [1, 11, 12, 15].

Следует четко понимать, что экономическая эффективность работы танкеров смешанного река-море плавания, имеющих в море дедвейт не выше 7-8 тыс. тонн, резко снижается, так как им приходится конкурировать с классическим морским тоннажем, имеющим значительно больший дедвейт (от 30 до 100 тыс. тонн и выше). Именно поэтому данные по таким портам, как Новороссийск, Туапсе и ряд других приведены для справки.

Танкеры малого тоннажа в морских условиях хорошо работают при перевозке особых грузов, таких как небольшие партии нефтепродуктов для конкретного грузополучателя на относительно небольшой дистанции (Турция, Румыния, Болгария, Греция), химические грузы, растительное масло и т.п. Однако подобные перевозки плохо прогнозируются и на этапе создания бизнес-плана не годятся для среднестатистической оценки срока окупаемости.

Таблица 7

Основные морские порты Черноморско-Азовского бассейна, где осуществляется отгрузка нефти и нефтепродуктов

	Порт	Ограничения	Грузы	Грузоотправители	Объем
1	Туапсе	Осадка 9,3-12,0 м	Нефть, дизтопливо, мазут, бензин и др.	ТНК-ВР, Лукойл, Газпром нефть, Русснефть	14,5 млн.т в год
2	Новороссийск	Осадка 9,1-19,5 м	Нефть, мазут, газойль, масла и др.	ТНК-ВР, Лукойл, Газпром нефть, Росснефть, Русснефть и др.	53,8 млн.т/2008 год
3	Кавказ	Северный район: осадка до 5,0 м; длина до 150 м; ширина до 21 м. Южный район: осадка до 3,5 м; длина до 140 м; ширина до 17 м.	Нефть, мазут, газойль, масла, битум, дизтопливо, жидкая химия и др.	ТНК-ВР, Лукойл, Газпромнефть	1,89 млн.т/год
4	Тамань	Глубина до 13 м	Аммиак, метанол, нефть, нефтепродукты	ТНК-ВР, Лукойл, Газпромнефть	Планируемые объемы перевалки через порт Тамань ЗАО «Таманьнефтегаз»: мазут – 3 млн.т; нефть – 5,5 млн.т; светлые нефтепродукты – 1 млн. т.

Продолжение табл.7

5	Темрюк	Осадка до 4,2 м, длина до 140 м	Жидкие химические грузы	ТНК-ВР, Лукойл, Газпромнефть	40-50 тыс.т в год, в планах: 150-200 тыс.т/год
6	Ейск	Осадка до 4,2 м, длина до 140 м	Дизтопливо, бензин (Argus). Растительное масло.	ТНК-ВР, Лукойл	8,53 тыс.т - сентябрь 2009 (Argus).
7	Азов	Осадка до 4,2 м, длина до 140 м	Мазут, дизтопливо	ТНК-ВР, Лукойл	34,56 тыс.т – сентябрь 2009 (Argus)
8	Ростов-на-Дону	Осадка до 4,2 м, длина до 140 м	Нефтепродукты (мазут, газойль, дизтопливо)	ТНК-ВР	Перевалка нефтепродуктов
9	Таганрог	Осадка до 4,2 м, длина до 140 м	Нефть, нефтепродукты (мазут, дизтопливо)	ТНК-ВР, Лукойл	112,42 тыс.т – сентябрь 2009 (Argus)
10	Мариуполь	Осадка до 8,0 м	Растительное масло		38 тыс.т в 2009 году
11	Бердянск	Осадка до 7,9 м	Светлые нефтепродукты, масла		227 тыс. т масла и 8 тыс. т нефтепродуктов в 2009 году. Пропускная способность до 800 тыс. тонн в год (светлые нефтепродукты и промышленные масла).

Продолжение табл.7

12	Керчь (РПК)	Осадка до 8,0 м	Нефтепродукты (мазут)	ТНК-ВР	
13	Феодосия	Осадка до 11,5 м	Сырая нефть, светлые нефтепродукты (масла), мазут	Лукойл, ЛЛК-Интернешнл	1,756 млн. т в 2009 г.
14	Севастополь	Осадка 5,75-9,75 м	Нефтепродукты, мазут		127 тыс.т в 2009 г.
15	Херсон	Осадка до 7,6 м	Нефтепродукты		86 тыс. т в 2009 г.
16	Николаев	Осадка до 10,3 м	Нефтепродукты (масла)		602 тыс. т в 2007 г.
17	Южный	Осадка до 12,4-13,2 м	Нефть, нефтепродукты, химикаты (аммиак, метанол, карбомидно-аммиачная смесь)	ТНК-ВП, Газпромнефть, Татнефть	223 тыс. т масла, 2,019 млн. т химических в 2009 г.
18	Одесса	Осадка до 12,5 м	Нефть, нефтепродукты (мазут, масла)	ТНК-ВР, Газпром нефть, Роснефть, Лукойл, Vitol, Казахстан, Айзербайджан	25 млн.т в год (максимум), 13 млн. т в 2009 г.
19	Ильичевск	Осадка до 10,5 м	Химикаты, мазут, масла, дизтопливо		20,65 тыс.т/сент 2009 (Argus)*
20	Рени	Осадка до 7,0 м	Нефтепродукты, химия		594 тыс. т в 2009 г.
20	Санкт-Петербург Петербургский нефтяной терминал	Глубина до 5,5 м, длина 160 м (причалы ПНТ-1, ПНТ-2)	Дизельное топливо (Л-0,2-62, ДЛЭ 1 вида, ДЛЭЧ-0.05, мазут флотский Ф-5, топливо технологическое экспортное ТТЭ-4, мазуты топочные М-40, М-100, вакуумный газойль		300 тыс. т в месяц

Продолжение табл.7

21	Санкт-Петербург РПК-Высоцк «Лукойл-П»	Осадка до 5,5 м (причал № 3)	Нефть, дизельное топливо, мазуты, вакуумный газойль		300 тыс. т в месяц
22	Калининград	Осадка 5,0-9,4 м	Нефть, масло базовое, бензин, газовый конденсат, дизельное топливо, мазут, печное топливо		5 млн.т/ г.

Поэтому наиболее распространенным для оценки «зимней» экономики танкеров смешанного река-море плавания являются данные по нефтеперевозкам либо с мелководных портов Азовского моря на Европу, либо по Каспию.

Основные этапы транспортировки нефти и нефтепродуктов по Каспийскому морю (и постройки судов для этой цели):

1. 1880-е годы – бурное развитие добычи нефти на Бакинских промыслах. Организация перевозок нефти по Каспийскому морю на Волгу и вглубь страны.

2. 1887 год – шхуна «Минин» грузоподъемностью 500 тонн – первое самоходное (паровое) нефтеналивное судно для Каспия.

3. 1903 год – первый дизельный танкер «Вандал» грузоподъемностью 820 тонн.

4. 1930 год – шхуны-нефтевозы для Каспийского морского пароходства «Ленин» и «Профинтерн» грузоподъемностью 7600 тонн.

Перевозки осуществлялись в три этапа с двумя перевалками: 1 этап – танкерами от Баку до морского рейда Астрахани, 2 этап – специальными рейдовыми баржами с рейда до Астрахани и 3 этап – от Астрахани по Волге речными баржами.

5. 1954 год – головной морской мелкосидящий танкер «Олег Кошевой» (грузоподъемностью 4000 тонн) с осадкой 4,0 м для прямых рейсов Баку-Астрахань. Ликвидируется перевалка на Астраханском морском рейде, но остается перегрузка на речные суда.

6. 1964 год – первые бесперевалочные рейсы из Поволжья на Махачкалу танкерами река-море плавания типа «Волгонефть» (грузоподъемностью 4800 тонн) с осадкой 3,3-3,5 м.

7. 1971 год – бесперевалочные перевозки сырой нефти из Актау в Волгоград танкерами река-море плавания типа «Волгонефть».

8. 1998 год – головной танкер проекта 00201Л (дедвейт 6600 тонн). Всего построено 10 судов (все – флаг Россия, «Палмали»).

9. 1999 год – головной танкер проекта 19612 (дедвейт 8000 тонн). Всего построено 5 судов («Палмали», флаг Россия – 3, Азербайджан – 2).

10. 2002 год – головной танкер проекта 005RST01 (дедвейт 6500 тонн). Всего построено 10 судов (все – флаг Россия, «Палмали»).

11. 2004 год – головной танкер проекта 19619 (дедвейт 13000 тонн). Всего построено 11 судов («Палмали», флаг Россия – 3, «Сафинат», флаг Россия – 1, Азербайджан – 7).

12. 2005 год – головной танкер проекта 00230 (дедвейт 12000 тонн). Всего построено 6 судов (Казахстан – 5, Азербайджан – 1).

13. 2008 год – головной танкер проекта RST22 (дедвейт 7000 тонн). Всего построено 7 судов («Палмали», флаг Россия – 5, Туркмения – 2).

14. 2009 год – головной танкер проекта RST22M (дедвейт 7100 тонн). Всего построено 4 судна (Россия – 4, «Палмали»), в постройке еще 6 судов.

15. 2011 год – приступили к постройке серии танкеров проекта RST27 (дедвейт 6970 тонн). Заказано для «В.Ф. Танкера» на Окской судовой верфи и на заводе Красное Сормово 25 судов.

По оценкам TRACECA 2000 года [16] максимальная добыча нефти в год составила в Казахстане 32 млн. тонн и Туркмении 9 млн. тонн, при этом 150 тыс. тонн нефти перевозились танкерами в порт Дюбенды (Азербайджан). В 1999 году Дюбенды перевалило 2,4 млн. тонн сырой нефти и 115 тыс. тонн нефтепродуктов, Актау – 2,1 млн. тонн сырой нефти, Туркменбаши – 233 тыс. тонн сырой нефти. К 2010 году прогнозировалась перевалка в Дюбенды от 4,4 до 5,7 млн. тонн нефти и от 2,1 до 2,7 млн. тонн нефтепродуктов, в Актау – от 3,8 до 4,4 млн. тонн нефти, в Туркменбаши – 780-910 тыс. тонн нефти.

Грузовая база для судов каспийского региона определяется особым географическим транзитным положением великого озера-моря и потребностями прикаспийских стран – России, Азербайджана, Казахстана, Ирана, Туркменистана и некоторых близлежащих стран – Грузии, Армении, Турции, Узбекистана, Омана, а также Индии, Афганистана, Пакистана.

Существующие и перспективные грузопотоки по Каспийскому морю показаны на рис. 3 и на рис. 4 соответственно. Нефтерминалы в районе Баку (Дюбенды, Сангачал) перерабатывали в 2009 году около 6,7 млн. тонн нефтегруза, Актау – около 10,1 млн. тонн, Туркменбаши и Окарем – около 3,3 млн. тонн, Махачкала – 3,9 млн. тонн.

Сейчас на Каспии действует около 90 танкеров (примерно, так как состав группировки может меняться, особенно летом, когда часть судов перебрасывается на река-море перевозки на перевалку).

Состав флота – см. в табл. 8.

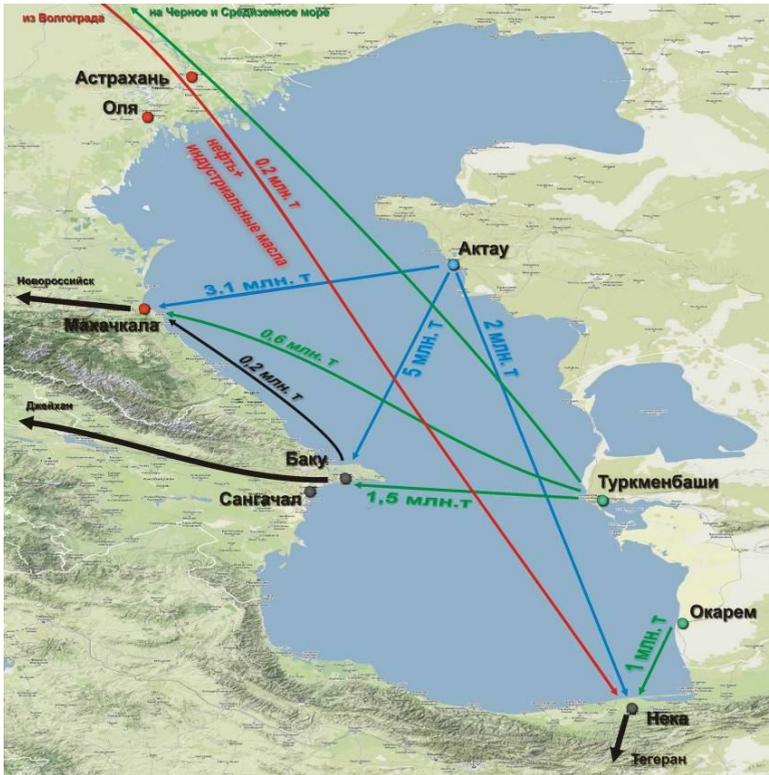


Рис. 3. Современные грузопотоки нефти и нефтепродуктов по Каспию

Таблица 8

*Состав и дедевит танкерного флота основных «игроков» на Каспии
(«старые» суда – танкера, не удовлетворяющие МАРПОЛ)*

Компания	Новые суда	Старые суда	Всего
Группа «Палмали»	31 / 229 тыс.т	19 / 68 тыс.т	50 / 297 тыс.т
«Сафинат»	1 / 13 тыс.т	3 / 18 тыс.т	4 / 31 тыс.т
Каспийское пароходство (Азербайджан)	10 / 121 тыс.т	35 / 225 тыс.т	46 / 346 тыс.т
Казмортрансфлот, Mobilex Energy (Казахстан)	7 / 87 тыс.т	-	7 / 87 тыс.т
Туркменское морское пароходство	3 / 19 тыс.т	-	3 / 19 тыс.т
Иранская национальная танкерная компания	1 / 5 тыс.т	-	1 / 5 тыс.т
Всего	53 / 474 тыс.т	57 / 311 тыс.т	110 / 785 тыс.т

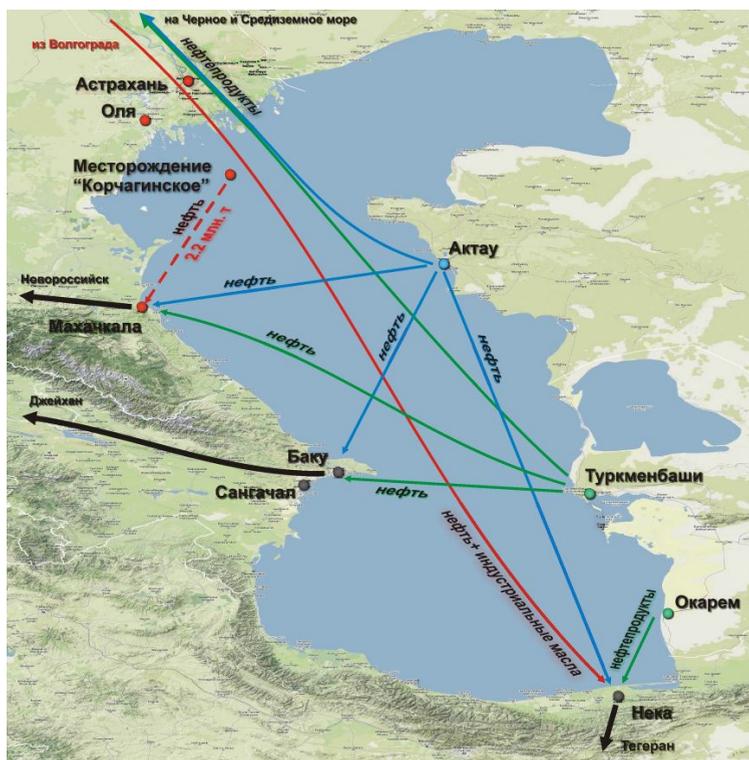


Рис.4. Перспективные грузопотоки нефти и нефтепродуктов по Каспию

Заметную часть перевозок (Казахстан – Махачкала, Казахстан – Азербайджан, Туркмения – Махачкала, Туркмения – Иран) контролирует группа компаний «Палмали», хотя объем перевозок сильно зависит от многих, в том числе и субъективных факторов.

«Сафинат» работает на перевозках на Махачкалу. Объем незначительный.

Суда компании «Навигатор» были отмечены на перевозках Туркмения – Иран.

Для работы на ПНХ «Юрий Корчагин» (в перспективе, добыча до 2,2 млн. тонн сырой нефти ежегодно) «Палмали» осуществляет дооборудование новых танкеров [8]:

1. Для приема швартова с ПНХ носовое швартовное устройство, включая увеличенный клюз, специальную швартовную лебедку и стопор.
2. Для приема плавучего шланга с ПНХ кран для подъема шланга увеличенной грузоподъемности; закрепление удерживающей цепи шланга.
3. Для аварийной буксировки кормовое буксирное устройство с увеличенным клюзом и буксирным кнехтом.

Основные типы современных танкеров, эксплуатирующиеся на Каспии:

1. Суда река-море «Волго-Дон макс» класса дедвейтом 5-7 тыс. тонн – суда оптимизированы под работу в Каспии на порты Ирана и Астрахань и на бесперевалочную транспортировку груза через ВДСК. Пример – танкеры типа «Армада» пр. 005RST01.

2. «Каспийские» дедвейтом 12-13 тыс. тонн – суда максимально возможных габаритов для работы в портах Актау, Баку, Махачкала, могут быть передислоцированы через Волго-Балтийский путь. Пример – танкеры пр. 19619.

Например, группа компаний «Палмали» имеет в составе каспийской группировки танкеры типа «Армада» (пр. 005RST01) и «Новая Армада» (пр. RST22) – 15 единиц, танкера типа «Лукойл» – 10 единиц, танкеры пр. 19612 – 3 единицы и танкера пр. 19619 (13-тысячники) – 3 единицы. Итого – 31 новый танкер. В весенне-летний сезон часть танкеров типа «Армада» и «Новая Армада» уходят на линию Татьяна – рейд порта Кавказ. Заказаны еще суда типа «Новая Армада» пр. RST22M, которые идеально подходят под условия Каспия.

В состав флота «Палмали» также входят танкеры пр. P77, 621 и 621.1 типа «Ленанефть» – 18 единиц и один танкер пр. 550A типа «Волго-нефть». Итого – 19 старых танкеров, которые в Каспии работают редко. Главная для них работа – линия Татьяна – рейд порта Кавказ.

По данным Seapnews, суммарный объем перевалки нефтеналивных грузов в российских портах Азово-Черноморского и Каспийского бассейнов по итогам января-июля 2011 года по сравнению с показателем 7 месяцев прошлого года снизился на 2,6 %. При этом в Азово-Черноморском бассейне – снижение на 2,2 %, а в Каспийском, напротив, рост на 14,1 %.

По итогам отчетного периода суммарный оборот нефти в черноморских портах РФ снизился на 3,3 %. Снижение отгрузок нефти демонстрирует все российские нефтеналивные терминалы Черного моря. «Шехарис» сократил перевалку на 1,1 %, КТК-Р – на 5,6 %, Туапсинский нефтеналивной терминал – на 6,8 %. Основная причина снижения – падение экспортных отгрузок нефти. По данным Минэнерго России экспорт российской нефти в страны дальнего зарубежья в январе-июле 2011 года составил 122,8 млн. т., что на 3,7 % ниже аналогичного показателя 2010 года.

При этом объем поставок нефти на нефтеперерабатывающие заводы России вырос на 4,7 % и составил 146,1 млн. т.

Объем перевалки нефтепродуктов в Азово-Черноморском бассейне сохранился в 2011 году на 2010 года, что является показателем стабильной работы танкеров смешанного река-море плавания, которые, как правило, везут не сырую нефть, а продукты ее переработки.

Интересно отметить, что перевалка нефтеналивных грузов в Махачкале выросла на 17,2 %. При этом основной объем приходится именно на сырую нефть, оборот которой за 7 месяцев 2011 года увеличился на

12,4 % благодаря поставкам углеводородного сырья с месторождения им. Ю. Корчагина, к промышленной добыче с которого приступили весной прошлого года. Груз перевозится танкерами группы компаний «Палмали». Астраханские нефтеналивные терминалы обрабатывают только нефтепродукты, объем которых из-за санкций в отношении Ирана по итогам отчетного периода снизился на 21,9 %.

Имея данные по конкретным грузопотокам и путевым условиям, следующим этапом решения внешней задачи проектирования является подзадача определения типа судна (состава) смешанного плавания [4].

Такой выбор осуществляется из ряда разработанных Морским Инженерным Бюро в период с 2001 по 2010 годы концептов:

Вариант 1 (см. рис. 5 а). ББС района R2 смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса с «морским» сцепом, толкач нового поколения (концепт CP1003.1 2010 года, разработан в рамках НИР по ФЦП по развитию гражданской морской техники).

Вариант 2 (см. рис. 5 б). ББС района «М-ПР» смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса с «речным» сцепом, баржа проекта 004ROB05 спроектирована под существующий толкач типа ОТ (концепт разработан в 2003 году по заказу «Палмали») [10].

Вариант 3 (см. рис. 5 в). Барже-буксирный состав района «М-ПР» смешанного река-море плавания «Волго-Балт макс» класса с «речным» сцепом, баржа проекта 005ROB04 спроектирована под толкач нового поколения (концепт разработан в 2002-2003 годах по заказу «Волготанкера»).

Вариант 4 (см. рис. 5 г). «Устьевой» танкер района «М-ПР» смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса с пониженным надводным габаритом (концепт 2010 года, разработан в рамках НИР по ФЦП по развитию гражданской морской техники, нефтеналивной аналог известного сухогрузного проекта RSD44).

Вариант 5 (см. рис. 5 д). Танкер района R2 смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса проекта RST22M типа «Новая Армада» с «нормальными» обводами (концепт разработан в 2009 году по заказу «Палмали», является развитием проектов 005RST01 – 2001-2003 год и RST22 – 2007 год) [5, 9].

Вариант 6 (см. рис. 5 е). Танкер района R2 смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса проекта RST27 с «полными» обводами (концепт 2010 года, разработан в рамках НИР по ФЦП по развитию гражданской морской техники).

Боковые виды танкеров и нефтеналивных ББС смешанного река-море плавания нового поколения приведены на рис. 5. Главные характеристики – в табл. 9.

Наиболее распространенными сегодня решениями являются Вариант 5 (к нему могут быть отнесены практически все уже построенные в XXI веке танкеры смешанного плавания) и Вариант 2 (аналогично, нефтеналивные баржи).

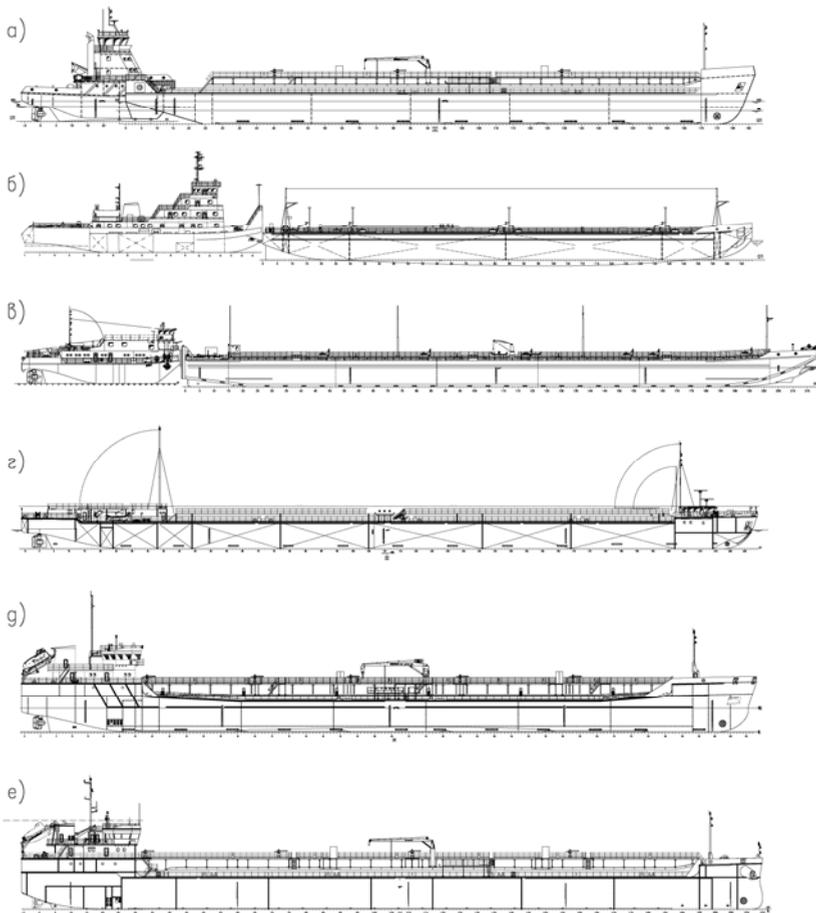


Рис. 5. Боковые виды танкеров и нефтеналивных БЭС смешанного река-море плавания нового поколения:

- а) БЭС района R2 смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса с «морским» сцепом, толкач нового поколения;*
- б) БЭС района «М-ПР» смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса с «речным» сцепом, существующий толкач типа ОТ, баржа проекта 004РОВ05;*
- в) БЭС района «М-ПР» смешанного река-море плавания «Волго-Балт макс» класса с «речным» сцепом, толкач нового поколения, баржа проекта 005РОВ04;*
- г) «Устьево́й» танкер района «М-ПР» смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса с пониженным надводным габаритом;*
- д) Танкер района R2 смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса проекта RST22М типа «Новая Армада» с «нормальными» обводами;*
- е) Танкер района R2 смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса проекта RST27 с «полными» обводами*

Таблиця 9

*Сравнительные характеристики танкеров
смешанного река-море плавания нового поколения*

Данные	ББС «Волго-Дон макс» класса	Баржа пр. 004ROB0 5 + толкач типа ОТ-2000	Баржа пр.005ROB 04+ толкач 2000RPT01	«Устье- вой» танкер (аналог RSD44)	пр. RST 22	пр. RST27
Длина наи- большая, м	139,90	142,6	151,80	139,99	139,95	140,85
Ширина B , м	16,70	16,70	16,80	17,00	16,6	16,86
Высота борта H , м	6,00	5,00	5,00	5,00	6,0	6,00
Осадка по ЛГВЛ d_M в море / d_p в реке, м	4,50/3,60	3,60/3.60	3,52/3.60	3,52/3,60	4,60/ 3,6	4,20/ 3,60
Дедвейт Dwt , т						
при $d = 3.6$ м (река)	4264	4218	5132	5522	4653	5378
при $d = 4.2$ м (море)	5509	4324	5132	5525	6161	6980
при осадке d_M	6060	4324	5132	5525	7050	6980
Скорость, узл при % от МДМ	10,5 (85%)	10,0	10,5 (85%)	11,0 (85%)	10,5 (85%)	10,0 (100%)
Объем грузо- вых танков, м ³	7653	4620	5780	6280	7833	7828
Допускаемая высота волны 3% обеспе- ченности, м	7,0	2,5 м	2,5	2,5	7,0	7,0 м
Мощность ГД	2 x 1250 кВт	2*736 кВт	2x1000 кВт	2 x 1200 кВт	2x 1200 кВт	2 x 1200 кВт
Экипаж/мест, чел.	9 чел. / 14 мест (буксир) + 1 чел. / 2 ме- ста (баржа)	14 / 18	8 / 9	8 / 16	12/14	12 / 14 + лоц- ман

Вообще на создание отечественных ББС оказывает значительное влияние успехи водного транспорта США [7], где более, чем 130 лет перевозка грузов по ВВП осуществляется исключительно методом толкания барже-буксирными составами (ежегодно около 600 млн. тонн груза). Перевозки осуществляются в режиме, аналогичном работе железной дороге.

Толкачи с мощностью от 3 до 10 тыс. кВт работают, толкая «поезда» из десятков барж-секций, на своих «перегонах», как тепловозы, между «станциями» (портами или шлюзами). Магистральные толкачи не используются для портовых и маневровых работ, формирования «поездов». Снабжение топливом, продовольствием и расходными материалами осуществляется на ходу.

В одном составе находятся баржи с разными грузами, например, с нефтеналивом и сухими грузами. В одном нефтеналивном «поезде» могут быть нефтепродукты 5-6 сортов. Сухогрузные секции после перевозки угля могут быть поставлены на перевозку зерна, конечно перед этим трюма покрываются полиэтиленовой пленкой, на порожних нефтеналивных баржах могут перевозить автомобили.

Рейдовые работы обеспечиваются малыми толкачами, которые растаскивают прибывшие на место назначения секции, ставят на их место следующие «вагоны» и «поезд» следует дальше.

Именно, исходя из подобных взглядов, для группы компаний «Палмали» был создан Вариант 2, который носил компромиссный характер, так как использовались существующие буксиры – толкачи, имеющие длину 45-50 м. Суда строились Волгоградским судостроительным заводом.

Вариант 3 являлся развитием Варианта 2 и был сделан, исходя из задачи, поставленной в 2003 году «Волготанкером АМС» – создать ББС для перевозки мазута на северо-западном направлении, используя толкачи нового проекта с уменьшенной до 30 м длиной (отсюда увеличенная длина баржи и состава в целом, под габариты Волго-Балта). В силу известных причин, ни баржи, ни толкачи этого концепта в постройку не пошли. В Варианте 3 невозможна эксплуатация ББС по южному направлению (перевозки из Татынски / Самары / Кашпир на Керчь / Кавказ) из-за несоответствия габаритов составов (по длине) габаритам внутренних водных путей (шлюзов), а также в Черном и Средиземном морях в межнавигационный период.

Варианты 2 и 3 имеют принципиальное ограничение по мореходности, так как используют традиционные отечественные сцепы типа О-200Т, которые не обеспечивают безопасное соединение на волнении высотой свыше 2 м (т.е. уже в условиях Ладоги и Онеги, а тем более Финского залива и Азовского моря приходится баржи не толкать, а буксировать, что снижает скорость перемещения состава с 10 узлов до 5).

Поэтому в 2010 году был создан Вариант 1 ББС морского исполнения, использующий инновационный полужесткий «морской» сцеп, сохраняющий работоспособность на волнении до 7 м. Кроме того, корпуса

баржи и толкача были сделаны под требования Российского морского Регистра Судоходства (т.е. более прочные и надежные, но и соответственно более тяжелые).

Вообще говоря, необходим переход на качественно новый уровень организации перевозок водным транспортом, который может быть, по опыту высокоразвитого речного транспорта США, достигнут за счет более широкого использования толкаемых барже-буксирных составов как классического речного типа (отечественные сцепы типа О-200, УДР-100 и т.п.), так и морского типа со сцепами японского, финского или американского типа. При этом следует ясно понимать, что просто созданием проекта ББС дело не обойдется, так как эффективная эксплуатация ББС требует коренной перестройки организации перевозок (т.е. применения так называемой «вертушки», когда на один толкач будут приходиться 2-3 баржи).

Пока эта же эта проблема не решена, и поэтому большую часть нового судостроения составляют не составные суда (толкач+баржа), а танкеры классического типа (например, Вариант 5).

Однако и в классическом подходе требуются инновационные решения. Новые суда должны качественно отличаться от существующих, идеология которых разрабатывалась в 50-е годы прошлого столетия в первую очередь более высокой производительностью, экологичностью и надежностью. Такие проекты должны обеспечивать «разшитие» узких мест, которыми стали являться очереди для прохода под Невскими мостами и под мостом в Ростове-на-Дону.

Отсюда появилась идея создать концепт танкера практически без выступающих над палубой тронка частей рулевой и жилой рубки, что позволило бы проходить под мостами в Санкт-Петербурге и Ростове, без их разводки. Так в 2010 году в рамках НИР по ФЦП по развитию гражданской морской техники был создан Вариант 4 – «устьевой» танкер района «М-ПР» смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса с пониженным надводным габаритом. За счет снижения класса судна по району плавания, удалость снизить массу судна порожнем и увеличить полноту судна, что соответственно увеличило грузоподъемность танкера на ограниченных в реке осадках (при осадке 3,60 м дедвейт Варианта 4 составляет 5522 тонны против 4653 тонн у Варианта 5, увеличение на 869 тонн). Суда могут эксплуатироваться на внутренних водных путях, Финском заливе Балтийского моря и в Азовском море до Керчи / Кавказа, поэтому их называют еще «устьевыми». Нелимитированный проход под мостами позволяет экономить до 20 суток ходового времени в сезон. Но при столько малом классе круглогодичная эксплуатация в данном варианте невозможна.

Соответственно, используя полученное Морским Инженерным Бюро совместно с ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова в рамках НИР по ФЦП новое теоретическое решение о возможности увеличения коэффициента общей полноты, был создан Вариант 6 – танкер района R2 смешанного

река-море плавания «Волго-Дон макс» класса проекта RST27 с «полными» обводами. Такой танкер, сохраняя по району плавания класс и возможность круглогодичной эксплуатации Варианта 5, приблизился по грузоподъемности к Варианту 4 (дедвейт при осадке 3,60 м 5378 тонн), хотя и потерял возможность прохода под мостами, без их разводки.

Сравнение возможностей применения тех или иных вариантов судов на перевозках в европейской части представлены в табл. 10.

Зная предполагаемый объем перевозок и линию, на которой будет перевозиться этот объем в установленные сроки, можно решить задачу определения необходимого количества судов.

Например, для перевозки 1,3 млн. т на линии Рыбинск-Высоцк рассчитаем потребность во флоте (при условии, что выбран в качестве концепта, например, Вариант 4). Результаты расчета приведены в табл. 11.

Таблица 10

Преимущества и недостатки инновационных концептов 2010 года

Показатели	Вариант 1	Вариант 4	Вариант 6
	барже-буксирный состав река-море плавания	«Устьевой» танкер	танкер река-море плавания
1. Грузоподъемность судна в реке	-	+	+
2. Грузоподъемность судна в море	+	-	+
3. Возможность работы зимой с совершением международных рейсов. Возможность круглогодичного использования в море в случае потери грузовой базы на ВВП	+	-	+
4. Возможность перевозки нефтепродуктов с температурой вспышки менее 60 градусов	+	-	+
5. Объем первоначальных инвестиций	-	+	-
6. Возможность перевозки Высокотарифицированных наливных грузов	+	-	+

Продолжение табл.10

7. Возможность самостоятельной работы толкачей отдельно от барж, возможность замены толкача при наличии технических неисправностей, возможность применения толкача для аварийно-спасательных мероприятий	+	-	-
8. Возможность прохождения мостов без разводки	+	+	-
9. Уровень затрат на ремонт и услуги регистра	-	+	+
10. Соответствие международным конвенциям	+	-	+
11. Доковый вес	+	-	-

Таблица 11

*Итоги расчета количества флота по вариантам
(для выбранного примера перевозок)*

Номер варианта	Вариант 1	Вариант 4	Вариант 6
Тип тоннажа	барже-буксирный состав река-море плавания	«Устьевой» танкер	танкер река-море плавания
Грузоподъемность в реке	4400	5400	5400
Количество судов	46	16	17
Баржа	23	0	0
Буксир-толкач	23	0	0
Самоходное судно	0	16	17

1. Размер судового потока M – количество отправок судов на линии, необходимое для освоения заданных перевозок, определяется как $M = G/Q_3 = 1300000 / 5400 = 241$ отправление, где G – объем перевозок, т, Q_3 – загрузка судна, т.

2. Частота отправок R – характеризует число отправок судов в сутки и определяется как $R = M/T_{отпр.} = 241/180 = 1,34$ отправок/сутки, где M – размер судового потока, отправок, $T_{отпр.}$ – период отправления, сутки.

Период отправления из Рыбинска оценен как $T_{отпр.} = 180$ сут. (с 03,05 по 29,10 с учетом прибытия груза в Рыбинск и возврата флота из Высоцка).

3. Потребность во флоте F – это расчетное число судов, которое необходимо для освоения заданных перевозок в установленные сроки, определяется как $F = R \cdot t_{кр.р.}$, ед., где R – частота отправлений, отпр./сут.; $t_{кр.р.}$ – время кругового рейса, сут.; F устьевых танкеров = $1,34 \cdot 11,5$ сут. = 16 ед.

Примечание. В примере учтено предположение, что перевозка груза до Рыбинска с базовых речных портов (Нижние Муллы, Кстово) будут осуществлять существующим нефтеналивным флотом, что позволяет исключить эксплуатацию достаточно старых судов в Ладоге, Онеге и Финском заливе, а также учитывает падение глубин в районе Городца, что существенно повлияет на эффективность нового флота, если он там будет работать.

Как показал экономический анализ приведенной выше задачи, наиболее высокий тайм-чартерный эквивалент (ТЧЭ) в эксплуатационные сутки достигается по Варианту 4, но календарный ТЧЭ максимален для Варианта 6 (за счет круглогодичной эксплуатации).

Срок окупаемость танкера по Варианту 4 оценивается в 12,6 года, по Варианту 6 – в 9,3 года (при пессимистичном прогнозе).

Поэтому рекомендуется строить нефтеналивные суда по Варианту 6 – танкеры района R2 смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса проекта RST27 с «полными» обводами (концепт 2010 года, разработан в рамках НИР по ФЦП по развитию гражданской морской техники).

Выводы

1. Танкеры и ББС смешанного река-море плавания используются (или могут использоваться) на следующих смешенного река-море перевозках в европейской части:

– на южном направлении (Татьянка, Самара, Саратов, Кашпир, Октябрьск и др. речные порты – РПК рейда порта Кавказ);

– на северо-западном направлении (Кстово, Нижние Муллы, Уфа, Нижнекамск и др. речные порты – РПК и российские порты Финского залива);

– на северном направлении (речные порты – порты Белого моря).

2. Танкеры смешанного плавания перевозят около 8,5 млн. тонн нефти и ее производных ежегодно.

3. Объем перевозок нефтепродуктов по северо-западному направлению (Кстово, Нижние Муллы, Уфа, Нижнекамск и др. речные порты – российские порты Финского залива) оценивается в 2015-2025 гг. в объеме 4,0 млн. тонн (оценка специалистов «В.Ф. Танкер» выше – 5,3 млн. тонн к 2015-2017 годам, фактически в 2010 году – 5,02 млн. тонн, в 2011 году – 5,27 млн. тонн).

4. Объем перевозок нефтепродуктов по южному направлению (Татьянка, Самара, Саратов, Кашпир, Октябрьск и др. речные порты – РПК рейда порта Кавказ, а также каспийский транзит) принят на перспективу 2015-2025 гг. в объеме 6,75-10,0 млн. тонн. Пока фактический объем меньше – в 2010 году 4,73 млн. тонн, в 2011 году – 4,65 млн. тонн.

5. Нефтерминалы в районе Баку (Дюбенды, Сангачал) перерабатывали в 2009 году около 6,7 млн. тонн нефтегруза, Актау – около 10,1 млн. тонн, Туркменбаши и Окарем – около 3,3 млн. тонн, Махачкала – 3,9 млн. тонн.

6. Объем перевалки нефтепродуктов в Азово-Черноморском бассейне в 2011 году сохранился на уровне 2010 года, что является показателем стабильной работы танкеров смешанного река-море плавания, которые, как правило, везут не сырую нефть, а продукты ее переработки.

Интересно отметить, что перевалка нефтеналивных грузов в Махачкале выросла на 17,2 %. При этом основной объем приходится именно на сырую нефть, оборот которой за 7 месяцев 2011 года увеличился на 12,4 % благодаря поставкам углеводородного сырья с месторождения им. Ю. Корчагина, к промышленной добыче с которого приступили весной прошлого года.

7. Рекомендуется строить нефтеналивные суда по Варианту 6 настоящей публикации – танкеры района R2 смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса проекта RST27 с «полными» обводами (концепт 2010 года, разработан в рамках НИР по ФЦП по развитию гражданской морской техники).

8. Общая потребность в танкерах смешанного река-море плавания оценивается минимум в 100 единиц. Следует иметь в виду, что в настоящее время уже заказано около 40 единиц такого флота, которые должны войти в строй в течение 2012-2016 годов.

Наличие потребности в таком количестве новых судов смешанного плавания создает благоприятные условия для отечественного судостроения.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Все о портах Украины, 2010.* – Одесса: ИАЦ «BST», «Порты Украины», 2010. – 664 с.
2. *Бамбуляк А., Францен Бьёрн. Транспортировка нефти из российской части Баренцева региона по состоянию на январь 2005 года.* – Сванховд Экологический Центр, 2005. – 92 с.
3. *Голенков В.Е. Внутренний водный транспорт в Транспортной стратегии РФ на период до 2030 года // Речной транспорт (XXI век).* – 2009. – № 3. – С. 36-42.
4. *Егоров Г.В. Выбор главных элементов сухогрузных и нефтеналивных судов смешанного «река-море» плавания // Судостроение.* – 2004. – № 6. – С. 10-16.

5. Егоров Г.В. Танкер «Армада Лидер», судно типа «река-море» дедвейтом 6440 тонн с винто-рулевыми колонками пр. 005RST01 // Судостроение и судоремонт. – 2004. – № 1(4). – С. 8-17.
6. Егоров Г.В. Перевозки отечественным водным транспортом, состояние речного флота и перспективы нового судостроения // Морская Биржа. – 2010. – № 4 (34). – С. 20-26.
7. Егоров Г.В. Масштабная реализация преимуществ толкаемых составов на практике. Подходы, принятые в водном транспорте США // Судостроение. – 2011. – № 2. – С. 18-21.
8. Егоров Г.В., Исупов Ю.И., Автутов Н.В. Проблемы создания плавучих нефтехранилищ для Каспийского моря // Труды НТК по СМК памяти проф. П.Ф. Папковича. – СПб: ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова, 2007. – С. 25-27.
9. Егоров Г.В., Исупов Ю.И., Ильницкий И.А. Танкер смешанного река – море плавания дедвейтом 7050 тонн типа «Новая Армада» пр. RST22 // Судостроение и судоремонт. – 2008. – № 3 (29). – С. 28-39.
10. Егоров Г.В., Исупов Ю.И., Ильницкий И.А. Нефтеналивные баржи смешанного «река-море» плавания грузоподъемностью 4320 т // Судостроение. – 2009. – № 4. – С. 19-22.
11. Морские порты России: Справочник. – М.: Морские вести России, 2007. – 427 с.
12. Нефтяные порты и терминалы России. Справочник. – М.: Морские вести России, 2006. – 304 с.
13. Рейд проверяют на экологичность. <http://www.rbcdaily.ru/2008/09/26/industry/382192>
14. Рыков Ю., Черный Ю., Фейгин В. Основные направления и тенденции развития технологий и оборудования нефтепереработки в России и в мире // Объединенное машиностроение. – 2010. – № 3. – С. 8-17.
15. Транспортировка нефтепродуктов через порты Юга России. Отчет. Академия конъюнктуры промышленных рынков. <http://www.akpr.ru>
16. Feasibility Study on the Rehabilitation and Modernization of Navigational Aids Systems in Caspian Sea Ports. – Report No. TNREG 9803. – TRACECA Traffic and Feasibility Studies. – November 2000. – 103 p.
17. <http://portnews.ru/news/43398/?print=1>

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 629.5 Е30

Г.В. Егоров, В.И. Штрамбранд

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЛЕДОКОЛЫ И ЛЕДОКОЛЫ-СПАСАТЕЛИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Показано, что современные ледоколы и специальные суда создаются многофункциональными. Правильное определение основной и вспомогательных миссий многофункционального судна, выбор соответствующих прототипов, использование надежных статистических данных и приближенных зависимостей позволяют определить сочетание оптимальных характеристик формы корпуса и главных размерений на начальных стадиях проектирования. Определенные таким образом характеристики судна обеспечивают высокую ледопробитность, хорошую ходкость в условиях чистой воды и удовлетворительную мореходность, что в целом предопределило успех выполнения миссии многофункционального судна ледового плавания. Дано описание новых проектов многофункциональных ледоколов и спасателей-ледоколов.

Ключевые слова: проектирование судов, ледоколы, суда-спасатели, многофункциональные суда, модельные испытания, форма корпуса, ледопробитность, пропульсивная установка.

Показано, що сучасні криголами та спеціальні судна створюються багатофункціональними. Вірне визначення головної та додаткових місій багатофункціонального судна, вибір відповідних прототипів, використання надійних статистичних даних та близьких залежностей дозволяють визначити сполучення оптимальних характеристик форми корпусу та головних розмірів на початкових стадіях проектування. Визначені таким чином характеристики судна забезпечують високу льодопробитність, добру швидкохідність в умовах чистої води та задовільну морехідність, що в цілому визначило успіх виконання місії багатофункціонального судна льодового плавання. Наведено опис нових проектів багатофункціональних криголамів та рятувальників-криголамів.

Ключові слова: проектування суден, криголами, судна-рятувальники, багатофункціональні судна, модельні випробування, формат корпусу, льодопробитність, пропульсивна установка.

It is shown that up-to-date ice-breakers and special vessels are built as multifunctional type. Proper definition of main and auxiliary missions of the multifunctional vessel, choice of adequate prototypes, usage reliable statistical data and approximate functions provide to determine combination of optimal characteristics of hull form and principal particulars at the initial stages of design process. Defined by such way vessel's characteristics provide high ice possibility, nice clear water running ability and suitable sea-keeping ability;

© Егоров Г.В., Штрамбранд В.И., 2012

all mentioned points ensured beforehand successful mission performance of the multifunctional ice vessel. Description of new designs of multifunctional ice-breakers and salvage/ice-breakers vessels is given.

Keywords: *designing of vessels, ice breakers, salvage vessels, multipurpose vessels, model tests, hull form, ice going capability, propulsion plant.*

Постановка проблемы. Достаточно часто можно услышать по совершенно различным поводам уничижительную фразу «Россия – родина слонов», т.е. ну разве можем (или разве могли...). Однако по отношению к ледоколам такое заявление абсолютно справедливо – «Россия – родина ледоколов».

В 1864 году судовладелец из Кронштадта Михаил Осипович Бритнев срезал, имея в качестве прототипа поморские торосные лодки, носовую оконечность портового буксира «Пайлот» – так был создан первый ледокол современного типа, который ломал лед своим весом. Первый же иностранный ледокол построили только в 1871 году в Гамбурге, причем с использованием чертежей «Пайлота».

В 1898 году по концепту, разработанному адмиралом Степан Осиповичем Макаровым, был создан первый арктический ледокол – «Ермак».

«Ермак», со своими носовыми шпангоутами в форме «клина», разрушавшими ледовое поле и отталкивавшими льдины; с наклоном в 20 градусов борта в средней части, что обеспечивало «выталкивание» корпуса при сильном ледовом сжатии; тремя кормовыми винтами для обеспечения более высокого КПД при повышенной мощности главных машин и резервирования в тяжелейших арктических условиях, двухотсечной непотопляемостью и креновой системой стал на долгие годы образцом для мирового ледоколостроения (такие суда так и назывались – «русского» типа).

В 1913 году Морское министерство Российской империи объявило конкурс на постройку 12 линейных и портовых ледоколов суммарной мощностью 27 тыс. л.с., но помешала война.

В 1959 году СССР построил первый в мире атомный ледокол «Ленин».

К 1989 году отечественный морской ледокольный флот имел в своем составе 36 единиц, которые выполняли функции проводки судов в ледовых условиях Арктики, Балтики, Дальнего Востока.

Целью настоящей статьи является обоснование расширения функций ледоколов и ледоколов-спасателей и учет многофункциональности при создании облика и обводов, выборе пропульсии этих судов нового поколения.

Основное назначение ледоколов в отечественных условиях.

Зимний период работа значительной части отечественных портов серьезно усложняется наличием льда [1, 8]. Из – 68 портов и портопунктов – 56 замерзающих и 12 незамерзающих. В частности, в Балтийском бассейне – 7 замерзающих портов: Калининград, Усть-Луга Санкт-Петербург, Балтийск, Высоцк, Приморск, Выборг. В Северном бассейне – всего 14 портов, из них 13 замерзающих: Амдерма, Архангельск, Варандей, Витино, Диксон, Дудинка, Игарка, Кандалакша, Мезень, Нарьян-Мар, Онега, Тикси, Хатанга и один незамерзающий – Мурманск. В Дальневосточный бассейне – всего 33 порта, из них 29 замерзающих: Александровск-Сахалинский, Анадырь, Беринговский, Бошняково, Ванино, Владивосток, Восточный, Де-Кастри, Зарубино, Корсаков, Красногорск, Магадан, Москальво, Мыс Лазарева, Мыс Шмидта, Николаевск-на-Амуре, Охотск, Певек, Петропавловск-Камчатский, Пластун, Посьет, Пригородное, Провидения, Советская Гавань, Углегорск, Усть-Камчатск, Холмск, Шахтерск, Эгвекинот; 4 незамерзающих: Находка, Невельск, Ольга, Поронайск. В Южном бассейне – 14 портов из них 7 замерзающих: Азов, Астрахань, Ейск, Оля, Ростов-на-Дону, Таганрог, Темрюк и 7 незамерзающих: Анапа, Геленджик, Кавказ, Махачкала, Новороссийск, Сочи, Туапсе.

Понятно, что в таких условиях роль ледоколов в обеспечении устойчивой работы морского транспорта была и остается значительной.

Еще большее значение судам, которые могут работать во льду, придается в связи с необходимостью продолжения освоения Арктики. Современная политика Российского государства в области развития арктического судоходства исходит из того, что Северный морской путь является исторически сложившейся национальной транспортной коммуникацией в Арктической России, которая в долгосрочной перспективе определяется в качестве мощной минерально-сырьевой базы страны.

На акватории Баренцева моря к настоящему времени открыто 11 месторождений нефти и газа. Среди них одно уникальное – Штокмановское, 7 крупных – Ледовое, Лудловское, Мурманское, Долгинское, Приразломное, Медыньское море и Северо-Гуляевское, 2 средних – Поморское и Северо-Кильдинское и одно небольшое – Варандей-море.

На шельфе Карского моря открыты два газоконденсатных месторождения – Русановское и Ленинградское. Оба они относятся к числу уникальных. Кроме того, обнаружен ряд газовых месторождений в Обской и Тазовской губах. На базе открытых месторождений в ближайшие годы начнется формирование новых нефтегазодобывающих центров России.

Моря восточно-арктического шельфа, особенно Восточно-Сибирское и Чукотское, – наименее изученные на всем континентальном шельфе России. Поэтому и геологические модели этой обширной части

Российской Арктики, и основанные на них количественные оценки углеводородных ресурсов являются пока приблизительными, но при этом весьма привлекательными.

В Арктической зоне сконцентрирована добыча 91 % природного газа и 80 % (от общероссийских разведанных запасов) газа промышленных категорий. Кроме углеводородного сырья арктические районы – Кольский полуостров, Таймыр, Чукотка, Якутия, Норильск – содержат запасы апатитового концентрата (более 90 %), никеля (85 %), меди (около 60 %), вольфрама (более 50 %), редкоземельных элементов (более 95 %), платиноидов (свыше 98 %), олова (более 75 % разведанных запасов – Северо-Янское месторождение), ртути (основные разведанные запасы – в пределах Яно-Чукотской провинции, крупные месторождения – на полуострове Таймыр), запасы золота, серебра (около 90 %), алмазов (более 99 % – на территории Якутии, в Архангельской области и Таймырском АО). Недра Арктики содержат и дефицитные в России руды: важнейшие месторождения марганца – на Новой Земле, хрома – в Ямало-Ненецком АО и на Мурмане, титана – на Кольском полуострове. На шельфе и арктических архипелагах установлены запасы и прогнозные ресурсы всех категорий россыпного олова, золота, алмазов, марганца, полиметаллов, серебра, флюорита, поделочных камней, различных самоцветов. Имеются предпосылки к открытию месторождений эндогенного золота, редкоземельных металлов, меди, фосфоритов, железа и ряда других полезных ископаемых.

17 сентября 2008 г. прошел Совет безопасности РФ, на котором обсуждались вопросы освоения Арктики. На заседании были утверждены основы государственной политики в регионе до 2020 года. Президентом Российской Федерации была поставлена задача разработать федеральный закон о южной границе арктической зоны России. Нельзя недооценивать сырьевые возможности региона, который, по словам Дмитрия Медведева, может стать «ресурсной базой России 21-го века».

Начало проекта освоения Арктики должна положить модернизация транспортной инфраструктуры. «Отсутствие дорог, местного авиасообщения – оно практически деградировало в постсоветский период – современных речных и морских портов, изношенность флота, в том числе ледокольного – это ощутимое препятствие в реализации богатого инвестиционного потенциала Арктики».

Наконец, Северный морской путь является вполне реальной альтернативой южному пути Япония, Китай, Корея – Европа.

Существующий и перспективный ледокольный флот. В период зимней навигации и в Арктике сейчас используются около 30 ледоколов. Среди них новые – «50 лет Победы», «Москва», «Санкт-Петербург», остальные дизель-электрические были построены в 70-80-е годы, атомные – в 80-90-е годы прошлого столетия. Пришло время строить новый флот [1, 2, 3, 8].

В соответствии с ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)» на смену судам типа «Ермак» и «Капитан Сорокин» должны прийти новые дизель-электрические ледоколы мощностью 25 МВт типа ЛК-25 (проект 22600), судам типа «Арктика» и «Таймыр» – универсальные атомные ледоколы мощностью 60 МВт типа ЛК-60Я (проект 22220), а также на Балтику дополнительно к уже построенным «Москве» и «Санкт-Петербургу» – линейные ледоколы мощностью 16 МВт.

Ведущий в области судостроения российский институт ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова приступил к отработке концепции атомного ледокола «Лидер» мощность 110 Мвт для нужд Северного морского пути. Как отметил директор института, академик Российской Академии Наук В.М. Пашин, такой ледокол будет обладать практически неограниченными возможностями действий в любой точке Арктического бассейна. Наряду с этим ЦНИИ им. Крылова совместно с ЦКБ «Айсберг» разработан технический проект атомного ледокола нового поколения мощностью 60 МВт (проект 22220) способного работать при двух осадках 10,5 м и 8,5 м и преодолевать лед толщиной 2,9 м. В проекте решены задачи по обеспечению максимально высоких качеств ледокола, прочности корпуса и безопасности энергетической установки.

Многофункциональность. Анализ реализуемых в мире проектов судов специального назначения, оффшорных судов, а также ледоколов свидетельствует о тенденции в мировом судостроении насыщать такие суда в максимальной степени дополнительными функциями [2-6, 7, 13].

Например, немецкий институт полярных и морских исследований Альфреда Вегенера заключил в 2009 году контракт с филиалом Wartsila Design (Schiffko) на проектирование исследовательского ледокола Aurora Borealis [14]. Aurora Borealis проектируется как многоцелевое ледокольное исследовательское судно для арктических и антарктических операций с возможностью автономного плавания во льдах толщиной до 4,5 м. Это позволит впервые проводить круглогодичные исследования, например, влияния глобального изменения климата. Судно будет способно выполнять научные работы по глубоководному бурению в районах с глубинами до 5000 м, причем глубина проникновения в грунт составит до 1000 м даже во время нахождения судна среди дрейфующих полей пакового льда.

Но еще в 2008 году, выполняя решения Совета Безопасности РФ, ФГУП «Росморпорт» поставил перед российскими проектантами и учеными задачу создать арктический линейный дизель-электрический ледокол, насыщенный в максимальной степени дополнительными функциями, т.е. многофункциональное судно [2, 3].

При этом все дополнительные функции не должны были уменьшать или снижать ледокольные характеристики судна, т.е. ледокол ориентировался не только на традиционные и абсолютно обоснованные потребности в ледоколах арктического класса, но и на прогнозе освоения

и экономического развития арктического региона, акваторий северных морей.

Такой многоцелевой ледокол мощностью 25 мВт проекта 22600 усилиями генерального проектанта – ПКБ «Петробалт» при участии финской проектной организации ILS OY, Морского Инженерного Бюро, ПКБ «Эра-Проект», группы исследовательских и научных организаций, обеспечивавших научную поддержку проекта (финской ледовой лаборатории «Aker Arctic Technology», ЦНИИ морского флота, Арктического и антарктического научно-исследовательского института) и поставщиков принципиального для ледокола оборудования (ЗАО «Транзас», WARTSILA, ABB, Роллс-Ройс) был создан [2, 3].

Расширение функциональных возможностей ледоколов за счет установки дополнительного оборудования, внедрения новых технических решений, придания новых свойств ледоколам позволяет существенно повысить их конкурентоспособность и увеличить спрос на такие суда в процессе эксплуатации.

В свою очередь, повышение спроса на ледоколы, обладающие расширенными возможностями, обеспечит их работой (следовательно, сделает их коммерчески выгодными) не только при осуществлении ледокольных проводок, но и позволит выполнять:

- буксировку крупногабаритных тяжелых морских объектов;
- доставку экипажей на платформы;
- транспортировку персонала научных экспедиций в комфортных условиях проживания и работы на судне, научные исследования и перемещение грузов с использованием вертолетов, специальной техники;
- осмотры подводной части морских нефтедобывающих платформ с использованием водолазного комплекса ледокола и базируемого на нем малогабаритного телеуправляемого подводного аппарата (МТПА);
- доставку грузов, размещаемых на палубе судна;
- грузовые операции и другие работы с использованием мощного кранового оборудования ледокола (при подготовке и проведении работ по прокладке подводных трубопроводов, при перемещении грузов на буровые платформы, при перемещении тяжелых грузов на лед и на другие суда);
- подводно-технические работы (в том числе с использованием кранового оборудования высокой грузоподъемности, МТПА, водолазного комплекса);
- работы по ликвидации разливов нефти с использованием бонов и другого нефтесборного оборудования, расположенных на борту ледокола;
- поисковые операции и промерные работы с использованием на чистой воде имеющегося на борту малогабаритного буксируемого гидролокатора бокового обзора, который может буксироваться рабочим

катером ледокола и осуществляют гидроакустическую съемку морского дна.

Рассматривается также возможность внедрения на проектируемых ледоколах беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения собственных задач (разведка ледовых полей и полыней по маршруту перехода, повышение эффективности проведения поисковых операций, оперативное определение границ нефтесодержащих пятен на морской поверхности при аварийных разливах нефти и т.п.).

Предполагается на одном из судов первой серии установить мощный кран грузоподъемностью 250 тонн.

Многофункциональность судна обеспечивается, в том числе за счет переносного оборудования в контейнерах, расширения таких функций за счет изменения архитектурно-конструктивного типа (перенос надстройки в нос, создание значительного грузового пространства на открытой палубе, оснащение специальным оборудованием).

В модульном исполнении целесообразно применять различные виды оборудования: водолазный комплекс; малогабаритный телеуправляемый подводный аппарат с глубиной погружения 600-1000 м (из расчета один на 2-3 судна); малогабаритный буксируемый гидролокатор бокового обзора (из расчета один на 2-3 судна); оборудование ЛАРН; аварийно спасательное оборудование и т.п.

В качестве основного варианта пропульсивного комплекса рассмотрены два ВРК мощностью около 8,5 МВт каждый, расположенных побортно, и одну центральную линию вала мощностью около 8,5 МВт.

При обосновании такого решения были проведены расчеты и модельных испытаний по всем возможным сочетаниям ВРК и традиционных линий валов для заданных в техническом задании условий эксплуатации.

При проектировании ледокола были разработаны современный дизайн интерьера основных служебных, общесудовых помещений и коридоров, кают членов экипажа и спецперсонала. Особое внимание уделялось обзорности, дизайну и эргономике ходового мостика.

Для обеспечения безопасности судоходства в замерзающих портах Российской Федерации и прилегающих морских районах были спроектированы многофункциональные ледокольные аварийно-спасательные судна мощностью 7 МВт (проект MPSV06) и 4 МВт (проект MPSV07) [4, 5, 6, 7, 13].

Средний срок службы судов-спасателей флота АСПТР России превышает 25 лет. Дальнейшая эксплуатация судов с таким сроком службы сопряжена со значительными затратами на текущее содержание, техническое обслуживание и ремонт, с увеличением риска аварийных происшествий и заметным моральным старением оборудования и самих концептов судов. В подобной ситуации единственным выходом является

строительство новых судов для обеспечения аварийно-спасательной готовности (АСГ).

Анализ характеристик существующих спасательных судов и фактически выполняемых ими функций в России и других странах, а также современных аналогов показывает, что общей тенденцией является строительство многофункциональных спасательных судов (МСС) и повышение мощности энергетической установки.

Такие МСС должны быть хорошо приспособлены, помимо ледокольных функций, для выполнения следующих задач:

- патрулирование, аварийно-спасательное дежурство в районах интенсивного судоходства, рыбного промысла, морских нефтяных и газовых промыслов;

- поиск, спасение, эвакуация и размещение людей, оказание им медицинской помощи;

- снятие с мели и рифов аварийных судов, откачка воды из затопленных отсеков;

- буксировка аварийных судов и объектов к месту убежищ, а также выполнение морских буксировок судов, плавучих объектов и сооружений во льдах и на чистой воде, оказание помощи судам и выполнение спасательных работ в ледовых условиях и на чистой воде;

- оказание помощи в тушении пожаров на плавучих и береговых объектах, доступных для подхода с моря;

- тыловое и техническое обеспечение, в том числе выполнение подводно-технических работ водолазов на глубинах до 60 метров;

- тушение горящего на воде топлива, ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов (ЛАРН);

- освидетельствование и очистка подводной части корпуса судов, плавучих и береговых объектов.

Основными факторами, определяющими успешное выполнение всего спектра аварийно-спасательных работ являются: достаточные ледопроездимость, ходкость на чистой воде, мореходность.

Наличие сложного сочетания функций приводит к взаимно противоречивым тенденциям в выборе обводов, главных размерений и других свойств МСС – ледоколов. Например, при выборе пропульсивного комплекса одновременно необходимо выполнить условия по четырем режимам эксплуатации:

- эксплуатация во льдах, в том числе обеспечение ледокольных функций;

- переход с эксплуатационной скоростью (примерно 70 % от полного хода), характерный для нахождения в заданном районе и для обычных переходов судна;

- режим полного хода при выходе на спасение;

- буксировка плавучих объектов.

С учетом того, что для судов с высокими ледовыми свойствами применение винтов регулируемого шага не рекомендуется, понятно, что оптимальное решение этой задачи для всех четырех режимов невозможно. Практический подход состоит в поиске «золотой середины» – компромиссного решения [7, 9, 10, 11].

Широкий спектр вышеупомянутых требований требует большого внимания и обоснованности в принятии решений, особенно на начальных стадиях. Форма корпуса судов ледового плавания является компромиссом между двумя противоречивыми требованиями – ледопроеходимостью и ходкостью на чистой воде. Соответствующий баланс между ними определяется приоритетом миссии судна. Следует иметь в виду, что обычной платой за ледопроежимость являются плохая ходкость и мореходность (достаточно вспомнить рассказы опытных ледокольщиков об их самочувствии в условиях качки).

При разработке новых ледоколов-спасателей Морским Инженерным Бюро в качестве прототипов рассматривались: ледокольные суда различного назначения, включая ледоколы мощностью до 10 МВт, предназначенные для ледокольного обслуживания транспортных судов на подходящих участках к портам, расположенным на побережье замерзающих неарктических морей; и многофункциональные суда обеспечения и снабжения для обслуживания буровых установок – арктические транспортные буксиры-снабженцы и суда обеспечения, участвующие в защите буровых установок от воздействия льда, их транспортном обслуживании и эпизодических буксировках. При этом учитывался тот факт, что суда, обслуживающие буровые платформы, при доставке снабженческих грузов совершают значительные переходы по чистой воде. Для современных ледоколов также характерно сочетание высоких ледокольных и удовлетворительных мореходных качеств, так как в летнее время они совершают значительные переходы по чистой воде.

Более широкий спектр работ многофункциональных спасательных судов в сравнении со специализированными ледоколами принципиально меняет подход к выбору формы корпуса. Поскольку, кроме выполнения ледокольных операций спасательные суда, прежде всего, должны работать согласно основному назначению, для них не могут быть рекомендованы обводы традиционного ледокольного типа. Наиболее предпочтительным является компромиссный вариант обводов, обеспечивающий требуемый уровень ходовых качеств судна как в ледовых условиях, так и на чистой воде.

Основным эксплуатационным критерием в ледовых условиях является зависимость скорости от ледопроежимости. Под ледопроежимостью судна подразумевается предельная толщина ровного сплошного льда, в котором оно, работая на полной мощности (максимальной длительной), способно двигаться непрерывным ходом с минимальной устойчивой скоростью 1,5-2 узла.

Принятие ледопроеходимости в качестве критерия ледовой ходкости основано на том, что она является интегральным показателем, учитывающим такие параметры как тяга гребных винтов, форма корпуса, главные размерения, материал корпуса и др.

Основными отличительными признаками формы обводов судов с высокой ледопроеходимостью являются ложкообразная носовая оконечность с большим развалом бортов, смещение максимальной ширины в нос от миделя, значительная протяженность цилиндрической вставки с малым развалом борта, наличие сломов судовой поверхности. Ложкообразная форма позволяет улучшить ледопроеходимую судна в ровных сплошных льдах при некотором снижении работоспособности в торосах. Днище корпуса образует ледоотводящий скег, с помощью которого обломки льда направляются под кромки канала и менее интенсивно попадают к винтам, незащищенным насадками. Для носовых обводов характерно наличие ледового уступа высотой около 60% от осадки, служащего для размещения носового подруливающего устройства. Значительная высота ледового уступа в сочетании с ложкообразной формой приводит к уменьшению угла наклона форштевня.

Отличительной особенностью многофункционального ледокола-спасателя является применение в качестве пропульсивного комплекса двух полноповоротных винто-рулевых колонок типа Azipod, которые в комплексе с двумя носовыми подруливающими устройствами обеспечивают судну повышенную маневренность как на чистой воде, так и во льдах.

Результаты обширных экспериментальных исследований (серийных модельных и натурных испытаний ледоколов и ледокольных судов различного назначения), анализ которых был выполнен в ЦНИИ морского флота профессором Л.Г. Цоем [8-11], позволили выявить характеристики формы корпуса судна, в наибольшей степени влияющие на ледопроеходимую.

Испытания серии моделей свидетельствуют о наличии оптимальных параметров формы носовой оконечности судна с точки зрения ходкости в сплошном льду. Оптимум достигается, главным образом, уменьшением угла наклона форштевня до 15 градусов и увеличением углов заострения КВЛ и развала борта на НП практически до 90 градусов. Однако, наилучшая ледопроедимую достигнута моделями с усовершенствованными традиционными (компромиссными) обводами, где значение углов угол носового заострения КВЛ и угол развала борта на носовом перпендикуляре имеют промежуточные значения и соответственно равны 45 и 65 градусов. Это позволяет рассматривать указанные характеристики формы носовой оконечности как наиболее рациональные.

Таким образом, при выборе формы обводов носовой оконечности наиболее перспективным следует считать дальнейшее совершенствование

традиционных обводов корпуса, позволяющее обеспечить гармоничное сочетание хороших ледовых качеств судна в условиях эксплуатации, как в сплошных, так и в природных битых льдах.

При выборе формы корпуса судов ледового плавания, как правило, приходится принимать компромиссные решения, позволяющие обеспечить удовлетворительные мореходные качества и заданную ледовую ходкость. В значительной мере это распространяется на многофункциональные аварийно-спасательные суда-ледоколы мощностью 7 МВт, которые значительную часть эксплуатационного времени будут плавать в условиях чистой воды.

Учет влияния параметров формы обводов носовой оконечности на ходкость на тихой воде и волнении производился по данным серии модельных экспериментов серии ледокольных судов с обводами традиционного типа и с усовершенствованными обводами. Удовлетворительная ходкость на тихой воде и волнении, полученная для ледокольных судов с усовершенствованной традиционной формой корпуса, позволяет считать ее наиболее рациональной для МСС перспективной постройки. При этом углы наклона форштевня φ и носового заострения КВЛ близкие к 20 и 45 градусам соответственно обеспечивают высокие ледовые качества. На рис. 1 представлена форма корпуса одного из проектируемых судов. Сплошные линии соответствуют первоначальной форме, пунктирные - улучшенной. Трехмерная модель формы корпуса представлена на рис. 2.

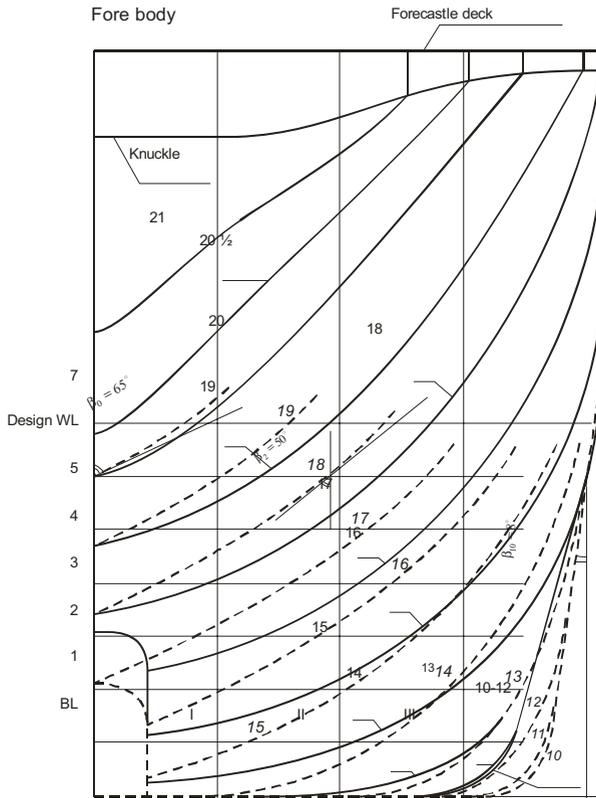


Рис. 1. Исходная и оптимизированная форма корпуса



Рис. 2. Трехмерная модель формы корпуса (вид с носа)

В результате проработок, изложенных выше, Морское Инженерное Бюро спроектировало МСС-ледокол мощностью 7 МВт с классом Российского Морского Регистра Судостроения **КМ**  **Icebreaker 6 2 AUT1-ICS OMBO FF2WS DYNPOS-1 EPP Salvage ship.**

МСС проекта MPSV06 будет иметь следующие основные характеристики:

Длина габаритная ок. 86,0 м;

Длина по КВЛ	77,47 м;
Ширина габаритная ок.	19,00 м;
Ширина по КВЛ	18,00 м;
Осадка по КВЛ	6,0 м;
Скорость	15 узл.;
Ледопроездимость	1,0 м;
Автономность	30 сут.;
Тяговое усилие на швартовах ок.	800 кН.

Судно оборудовано дизель-электрическим пропульсивным комплексом в составе четырех дизель-генераторов суммарной мощностью 10,6 МВт, двух гребных электродвигателей переменного тока, обеспечивающих работу двух полноповоротных винто-рулевых колонок с мощностью 3,5 МВт на каждом винте. Для работы во льдах винто-рулевые колонки оборудованы винтами фиксированного шага без насадок.

Судно оборудовано двумя носовыми подруливающими устройствами типа «винт в трубе» мощностью 900 кВт каждое. Подруливающие устройства совместно с винто-рулевыми колонками обеспечивают выполнение требований к судам с символом DYNPOS-1 в классе.

Для выполнения морских буксировок судно оборудовано кормовой буксирной лебедкой с тяговым усилием около 900 кН.

Судно оборудовано спасательным скоростным рабочим катером для доставки аварийной партии и аварийного снабжения, а также сбора людей с поверхности воды.

В качестве средства спасания людей с поверхности воды предусматривается установка морской эвакуационной системы, кроме того, судно оборудуется специальной спасательным плотом для подъема людей из воды и сеткой для массового сбора людей из воды.

Предусматривается установка на судно водолазного комплекса для выполнения работ на глубинах до 60 м (с аппаратурой подводного телевидения, подводной резки и сварки) в контейнерном исполнении, а также глубоководного (до 300 м) мобильного водолазного комплекса в контейнерном исполнении.

Для ликвидации аварийных разливов нефти судно оборудовано бортовой нефтесборной системой, двумя скиммерами щеточного типа, двумя комплектами бонового заграждения длиной 250 м каждый, а также двумя катерами-бонопостановщиками.

Судно оборудовано средствами борьбы с пожаром на других судах, в соответствии с требованиями к судам с символом FF2 в классе, а также системой водяных завес и орошения (WS). В носовой части судна установлена площадка для приёма вертолетов. Базирование вертолетов на судне не предусматривается. На судне предусматривается размещение

глубоководного (до 1000 м) телеуправляемого аппарата типа «Scorpio», также имеется гидролокатор бокового обзора.

Для спуска и подъема аппарата типа «Scorpio», катеров, водолазного оборудования и развертывания средств ЛАРН на судне предусматривается установка двух поворотных кранов грузоподъемностью 32 т и вылетом стрел 22,5 м, а также кормового крана грузоподъемностью 80 т и А-образной стрелой.

Для улучшения параметров обитаемости на судне установлен успокоитель бортовой качки, работающий на основе принципа вытеснения жидкости сжатым воздухом

Общее расположение судна представлено на рис. 3.

Ледовые испытания модели МСС мощностью 7 МВт проводились в ледовом бассейне фирмы Aker Arctic. Целью испытаний являлось гарантированное обеспечение ледопроходимости судна в сплошном льду на переднем ходу. При скорости переднего хода 1,5-2,0 узл. толщина сплошного льда, со снежным покровом толщиной 20-25 см должна составлять не менее 1,0 м. Исследовалась ледопроходимость в сплошном льду на заднем ходу, также как ледопроходимость в канале и в шуге на переднем и заднем ходу.

Модель судна была выполнена в масштабе 1:20 и оборудована комплектом движителей фирмы Rolls-Royce. Диаметр винтов составлял 170 мм. Общий вид оборудованной модели представлен на рис. 4.

Общее число ледовых режимов составило 4:2 на переднем ходу и 2 на заднем. Толщина сплошного льда составляла 1,10 м и 0,60 м на переднем и заднем ходу. Программа испытаний была идентична на каждом ледовом режиме.

Как показали результаты испытаний, судно полностью удовлетворяет требованиям ледопроходимости в сплошном льду на переднем ходу. Ледопроходимость в сплошном льду на заднем ходу хуже, чем на переднем. С уменьшением толщины льда ледопроходимость на заднем ходу становится лучше, чем на переднем. В мелкобитом льду движется очень хорошо и не испытывает затруднений в движении на переднем и заднем ходу, при развороте в канале. Некоторые детали испытаний представлены ниже (см. рис. 5 и 6).

Оценка ходкости судов производилась методом последовательных приближений. краткое описание основных этапов приведено далее.

На первом предварительном этапе CFD-методом были произведены численная оценка буксировочного сопротивления и ходкости судна. Некоторые результаты этих оценок представлены на рис. 7-9.

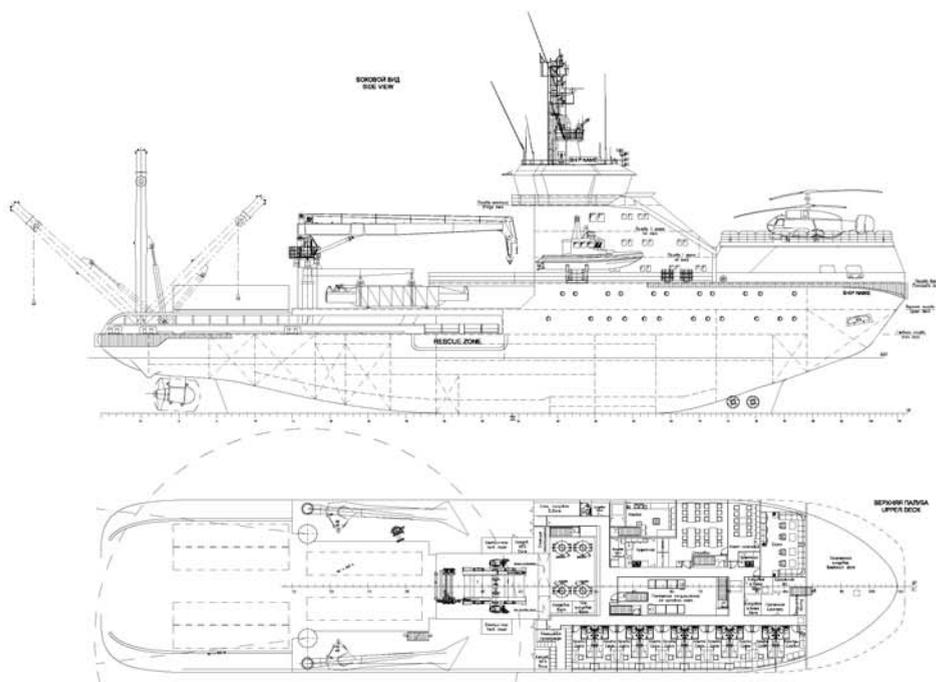


Рис. 3. Общее расположение проекта ледокола-спасателя мощностью 7 МВт

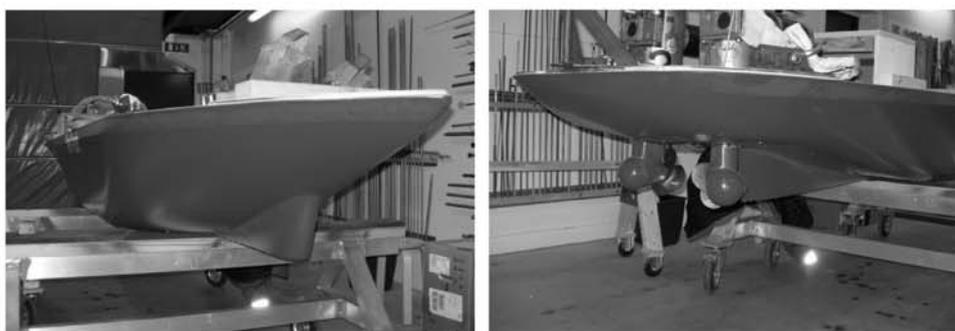


Рис. 4. Модель, испытанная в ледовом бассейне фирмы Aker Arctic (вид с носа и с кормы)

Затем на больших моделях были проведены предварительные буксировочные и самоходные испытания в опытовом бассейне на тихой воде. Общий вид одной из больших моделей представлен на рис. 10.

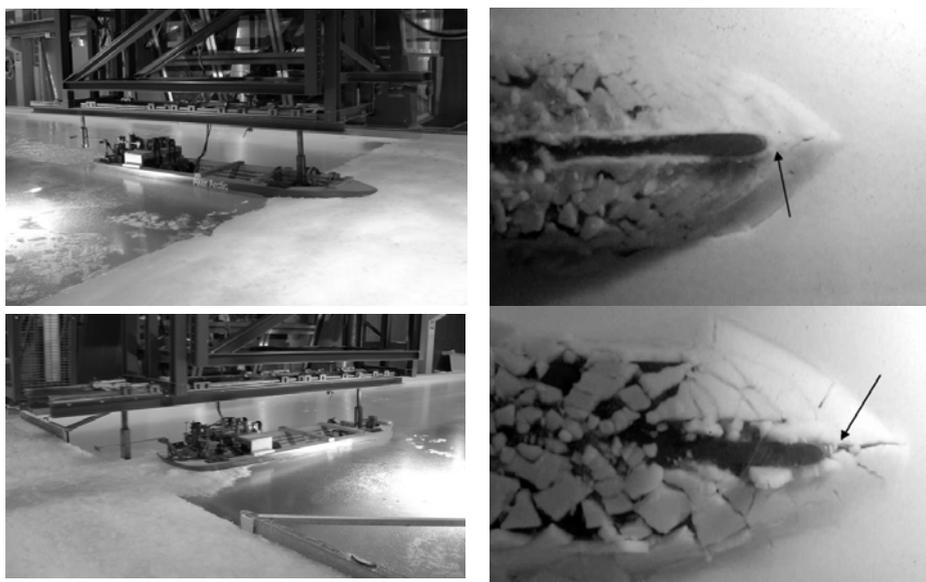


Рис. 5. Фрагменты видеозаписей испытаний при толщине льда 0,50 м и 1,00 м

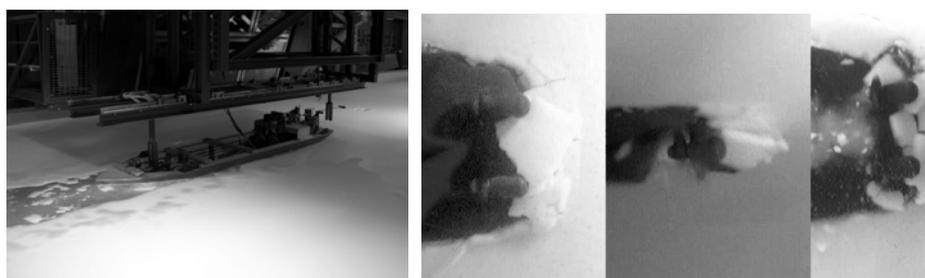


Рис. 6. Фрагменты видеозаписей испытаний на заднем ходу при толщине льда 1,10 м

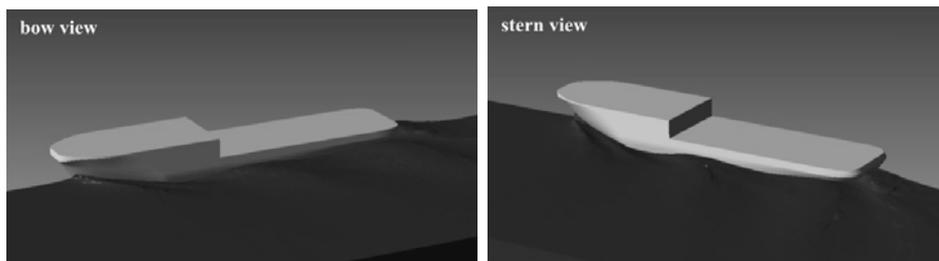


Рис. 7. Возмущенная свободная поверхность при движении со скоростью 15 узлов

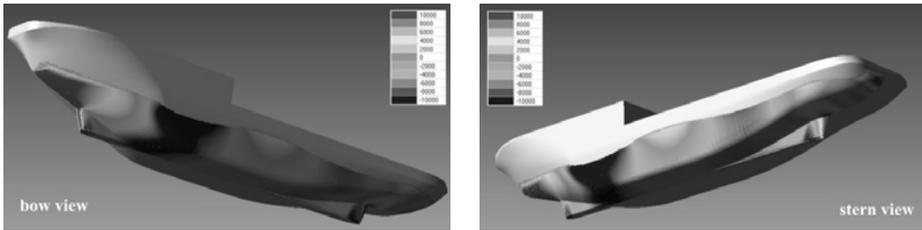


Рис. 8. Распределение гидродинамических давлений по смоченной поверхности корпуса без ДРК при движении на тихой воде со скоростью 15 узлов (исключая гидростатическое давление), Па

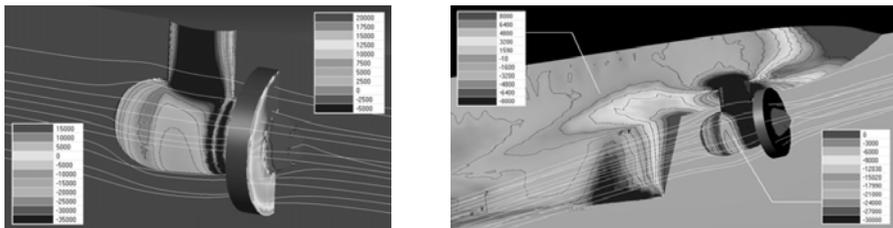


Рис. 9. Распределение гидродинамических давлений по смоченной поверхности корпуса с ВРК при движении на тихой воде со скоростью 15 узлов (исключая гидростатическое давление) вид с кормы, Па

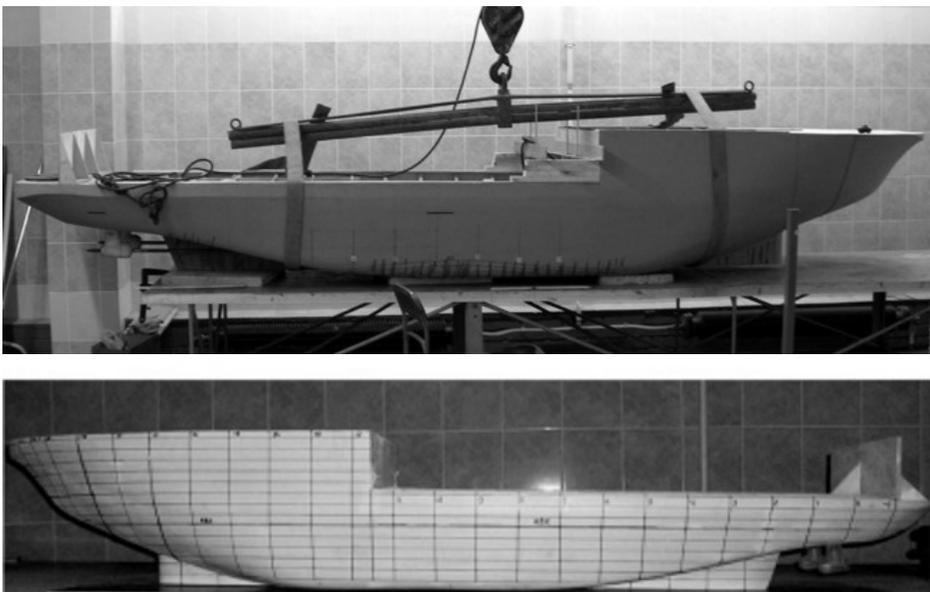


Рис. 10. Общий вид большой модели для буксировочных и самоходных испытаний и малой модели для мореходных испытаний

На следующем этапе дополнительные буксировочные и самоходные испытания в опытовом бассейне на тихой воде были произведены с целью получения необходимых данных для проектирования гребного винта полноповоротной винто-рулевой колонки (ВРК). Испытания включали буксировку голого корпуса, корпуса с выступающими частями, включая насадку ВРК, самоходные испытания в швартовом режиме и режиме полного хода.

Испытания модели полноповоротной ВРК, состоящей из насадки, винта и обтекателя в открытой воде явились следующим этапом исследований. Схема и устройство экспериментальной установки представлены на рис. 11. Испытания и последующий пересчет их результатов на натуру проводились в соответствии с процедурой рекомендованной МКОБ «Propulsion, Performance Podded Propulsor Tests and Extrapolation» 7.5 02-03-01.3.

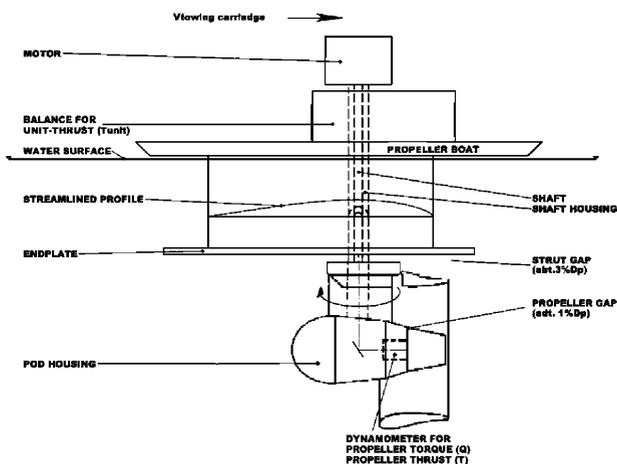


Рис. 11. Схема и устройство экспериментальной установки для определения характеристик ВРК в открытой воде

Последним этапом экспериментальных исследований ходкости являлся пересчет результатов модельных испытаний на натуру.

Результаты пересчета полностью подтвердили тот факт, что судно в условиях переднего хода на чистой тихой воде удовлетворяет соответствующим требованиям ходкости в режимах буксировки плавучих объектов, патрулирования (70 % скорости полного хода) и полного хода при следовании к месту спасательных операций.

Рассматриваемые суда должны обладать хорошей мореходностью качествами в самом широком смысле этого слова. Учитывая необходимость эксплуатации в суровых погодных условиях, их устройство и форма корпуса должны обеспечивать надлежащие условия

для оборудования и людей, работающих на открытых палубах во время грузовых и аварийно-спасательных операций на волнении.

Численная оценка мореходности производилась с использованием метода плоских сечений и линейной гидродинамической теории качки [12]. Сначала определялись присоединенные массы, коэффициенты демпфирования корпуса, и передаточные функции качки судна с шестью степенями свободы. Затем рассчитывались составляющие ускорений, вертикальные перемещения и скорости относительно взволнованной поверхности, а также дополнительное сопротивление на регулярном волнении. На последнем этапе расчетов мореходности определялись статистические характеристики качки и кинематики судна на нерегулярном волнении.

Результаты расчетов на регулярном волнении сопоставлялись с соответствующими данными испытаний моделей, включающими дополнительное сопротивление, вертикальную, килевую качку и вертикальные ускорения при движении на встречном волнении, а также бортовую качку и вертикальные ускорения на волнении лагом без хода. Сопоставление результатов показало их удовлетворительное соответствие. Поэтому последующая оценка мореходности производилась на основе данных расчетов.

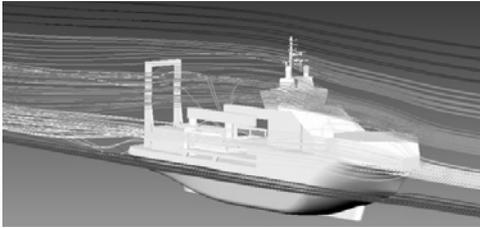
Аэродинамика в зоне взлетно-посадочной площадки. Пилот вертолета имеет весьма ограниченный обзор. Однако, возможные пути подлета к палубе и взлетно-посадочной площадке должны быть постоянно в поле его зрения. Это обстоятельство и диктует ограничения геометрии маневров.

Суровые погодные условия в открытом море и тяжелые ледовые условия эксплуатации в сочетании с влиянием корпуса и надстроек судна могут привести к большим аэродинамическим нагрузкам. Вертолетная площадка в подобных условиях может перемещаться во всех направлениях случайным образом и оказывается подверженной воздействию турбулентных потоков, обусловленных неблагоприятным направлением и скоростью ветра, влиянием корпуса и надстроек судна. В подобных условиях баланс аэродинамических и инерционных нагрузок, действующих на лопасти воздушного винта вертолета, может быть нарушен. Это явление хорошо известно и может привести к низкочастотной вибрации лопастей и их схлестыванию с хвостовой балкой. Последнее часто оказывается фатальным для экипажа вертолета и палубной команды.

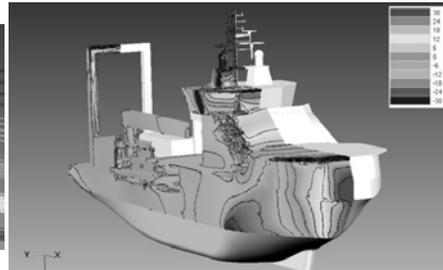
Для предварительного определения характеристик воздушного потока в районе вертолетной площадки использовались CFD-методы. Соответствующие результаты представлены на рис. 12.

Значительно более точные результаты были получены в результате модельных испытаний в аэродинамической трубе (см. рис. 13).

Проведение этих испытаний, в соответствии с рекомендациями ИКАО, позволило получить достаточно надежные материалы в необходимом объеме для составления практического руководства по выполнению взлетно-посадочных операций, определить допустимые при этом скорости и направления ветра.



Линии тока в надводной части при движении со скоростью 15 узл. (ветер отсутствует)



Распределение аэродинамических давлений в надводной части при движении со скоростью 15 узл. (ветер отсутствует), Па

Рис. 12. Результаты численной оценки аэродинамических характеристик корпуса

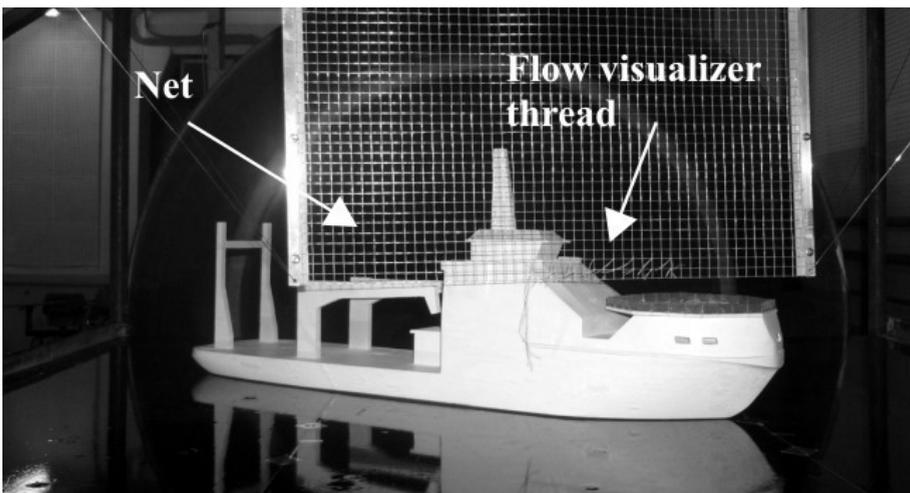


Рис. 13. Общий вид модели надводной части корпуса при испытаниях в аэродинамической трубе

Заклучение

1. Анализ реализуемых в мире проектов судов специального назначения, оффшорных судов, а также ледоколов свидетельствует о тенденции в мировом судостроении насыщать такие суда в максимальной степени дополнительными функциями.

2. Наиболее перспективным направлением развития форм корпуса судов ледового плавания является дальнейшее совершенствование традиционных ледовых обводов. Они позволяют обеспечить гармоничное сочетание хороших ледовых качеств судна при эксплуатации как в сплошных, так и в природных битых льдах.

3. Правильное определение основной и вспомогательных миссий многофункционального судна, выбор соответствующих прототипов, использование надежных статистических данных и приближенных зависимостей позволяют определить сочетание оптимальных характеристик формы корпуса и главных размерений на начальных стадиях проектирования.

Определенные таким образом характеристики судна обеспечивают высокую ледопроеходимую, хорошую ходкость в условиях чистой воды и удовлетворительную мореходность, что в целом предопределило успех выполнения миссии многофункционального судна ледового плавания.

3. Разработаны проекты многофункциональных ледоколов и МСС-ледоколов с высокими ледовыми качествами, хорошей ходкостью в условиях чистой воды и удовлетворительной мореходностью.

4. В настоящее время суда находятся в стадии строительства на Амурском судостроительном заводе (монофункциональные спасатели – ледоколы мощность 7 МВт) и Невском судостроительно-судоремонтном заводе (многофункциональные спасатели с высокой ледовой категорией мощность 4 МВт). Заводы ОАО «Объединенная судостроительная корпорация» в ближайшее время приступят также к строительству линейных дизель-электрических ледоколов мощность 25 МВт и балтийских ледоколов мощностью 16 МВт.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Буянов С.И., Цой Л.Г. Ледоколы и буксиры нового поколения // *Наука и транспорт*. – 2011. – С. 42-44.
2. Егоров Г.В. Многофункциональный арктический ледокол нового поколения // *Вестник транспорта*. – 2008. – № 11. – С. 7-8.
3. Егоров Г.В. Цель и задача: проектирование мощных ледоколов XXI века // *Морская Биржа*. – 2008. – № 4 (26). – С. 64-65.
4. Егоров Г.В. Проектирование спасательных судов // *Морской Флот*. – 2009. – № 1. – С. 42-44.

5. Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Автутов Н.В. Концепты российских многофункциональных судов-спасателей нового поколения // Судостроение и судоремонт. – 2010. – № 41. – С. 24-32.
6. Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Автутов Н.В. Особенности проектирования корпусов многофункциональных судов-спасателей нового поколения // Труды НТК по СМК памяти акад. Ю.А. Шиманского. – СПб.: ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова, 2011. – С. 37-38.
7. Принципы создания нового поколения российских многофункциональных судов-спасателей для работы в ледовых условиях / И.Е. Захаров, Г.В. Егоров, И.А. Ильницкий, Н.В. Автутов, И.Ф. Давыдов // Морская Биржа. – 2010. – №3 (33). – С. 24-33.
8. Перспективные транспортные средства для Арктики // Сб. научн. тр. ЦНИИМФ. – СПб. – 2003. – 234 с.
9. Цой Л.Г. Формула для определения ледопроеходимости и рекомендации по выбору формы обводов корпуса ледоколов и транспортных судов ледового плавания // Перспективные типы морских транспортных судов, их мореходные и ледовые качества // Сб. научн. трудов ЦНИИМФ. – М.: Транспорт, 1990. – С. 141-144.
10. Цой Л.Г. Определение потребной мощности ледоколов и ледокольно-транспортных судов по заданной ледопроеходимости: Методические указания. – СПб.: СПбГМТУ, 2003. – 27 с.
11. Цой Л.Г., Глебоко Ю.В. Влияние формы носовых обводов ледоколов на ходкость на тихой воде и волнении // Архитектурно-конструктивный тип, мореходные и ледовые качества транспортных судов // Сб. научн. трудов ЦНИИМФ. – СПб.: Транспорт, 1992. – С. 116-124.
12. Guliev J.M., Davydov I.F. Practical Estimation of Safe Ship Speed in Waves. // Proc. of Jubilee 15th Session SMSSH. – Varna, 1986. – Vol. 2. Report № 7.
13. Egorov G.V., Nilva A.E., Davydov I.F. Principles of Creation of New Generation of Russian Multipurpose Rescue Vessels for Ice Conditions // Proc. of the 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS 2010). – Rio de Janeiro, Brazil, 2010. – Vol. 1. – P. 569-578.
14. Multi-functional advanced research vessel Aurora Borealis // Ship & Port. – 2009. – № 02. – P. 60-61.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 629.12.001

О.В. Бондаренко, В.О. Некрасов

КОНЦЕПЦІЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ, НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ МОРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ СУДЕН

Описано концепцію комплексного оцінювання надійності, ефективності та безпеки суден. Наведено формули для визначення величини збитків від аварійних подій.

Ключові слова: безпека, ефективність, надійність, ризик, транспортне судно, концепція.

Описана концепция комплексной оценки надежности, эффективности и безопасности судов. Приведены формулы для определения величины ущерба от аварийных происшествий.

Ключевые слова: безопасность, эффективность, надежность, риск, транспортное судно, концепция.

Conception of complex estimation of reliability, efficiency and safety of ships is described. Formulas for determination of size of costs casualtis are resulted.

Keywords: safety, efficiency, reliability, risk, transport ship, conception.

Постановка проблеми. Проблема підвищення безпеки на морі була і залишається досить актуальною. Аналіз аварійності суден світового флоту показує, що незважаючи на прийняті зусилля у середньому щорічно гине 207 суден і втрачається 644 людських життів. При цьому слід врахувати, що вказані цифри охоплюють тільки морські судна тоннажем 100 рег. т і більше. І хоча в більшості випадків причиною аварій є людський фактор, все ж велике значення для наслідків аварійності мають конструктивні рішення, зроблені на етапі проектування судна.

Оскільки підвищення рівня надійності та безпеки судна пов'язане з певними капіталовкладеннями, то виникає необхідність оцінювання економічної ефективності таких капіталовкладень з урахуванням досягнутого рівня надійності та безпеки. Така задача є досить складною та потребує розробки відповідної концепції.

Метою даної статті є розробка концепції комплексної оцінки ефективності, надійності та безпеки при вирішенні задачі синтезу морських транспортних суден.

Виклад основного матеріалу дослідження. У статті під концепцією безпеки розуміється прийнята система поглядів і підходів до оцінювання рівня безпеки, який виражено певною кількісною мірою, і визначення допустимої величини цього рівня [1].

Основою запропонованої концепції є системний підхід [2-4] відповідно до якого судно розглядається як складна система, що складається з наступних елементів (підсистем): корпус, пропульсивний комплекс, навігаційна система, суднові системи і пристрої і так далі. Кожна з цих підсистем сама є складним об'єктом, відмова якого може призвести до виникнення аварійної морської події (АМП). У той же час на безпеку судна (М – машина), окрім властивостей самого судна і його елементів впливає персонал/екіпаж (Л – людина) і навколишнє середовище (С – середовище). Навколишнє середовище охоплює елементи, які не увійшли до складу системи. Навколишнє середовище негативно впливає на функціонування системи.

Таким чином, основним об'єктом небезпек в морській транспортній системі є система "людина – машина – середовище".

Оскільки в даній роботі розглядається безпека судна з точки зору його економічної ефективності, то для оцінки показників ефективності необхідно розробити модель функціонування. Така модель повинна відображати ті умови, які виникають при реальній експлуатації судна і за якими накопичено статистичний матеріал.

В термінах теорії надійності протягом життєвого циклу судно може перебувати в одному з наступних станів: працездатному, непрацездатному і небезпечному. Якщо судно знаходиться в працездатному стані, то воно може виконувати свої функції: перевезення вантажів, пасажирів. Функціонування судна пов'язане з певними виробничими операціями. Для вантажного судна це: перехід морем з вантажем, баластний перехід, завантаження, розвантаження, обслуговування і інспекція, укомплектування і постачання.

Динаміка переходу судна між портами (баластний перехід або перехід з вантажем) визначається за допомогою рівняння руху на хвилюванні [5]

$$(M + \mu_{11}) \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} + R\left(\frac{\partial Z}{\partial t}, t\right) + \Delta R\left(h_{3\%}, \frac{\partial Z}{\partial t}, t\right) = T\left(\frac{\partial Z}{\partial t}, t\right) + \Delta T\left(h_{3\%}, \frac{\partial Z}{\partial t}, t\right) + F\left(h_{3\%}, \frac{\partial Z}{\partial t}, t\right)$$

або

$$(M + \mu_{11}) \frac{\partial v}{\partial t} + R(v, t) + \Delta R(h_{3\%}, v, t) = T(v, t) + \Delta T(h_{3\%}, v, t) + F(h_{3\%}, v, t), \quad (1)$$

де M, μ_{11} – маса і приєднана маса відповідно;

v – швидкість судна;

$R(v, t)$ – сила опору;

$T(v, t)$ – тяга гвинта;

$F(h_{3\%}, v, t)$ – збурююча сила;

$\Delta R(h_{3\%}, v, t)$ – додатковий опір викликаний вітром і хвилюванням;

$\Delta T(h_{3\%}, v, t)$ – вплив хитавиці на роботу гвинта.

При стаціонарному русі із сталою швидкістю $R = T$, тоді

$$\frac{\partial v}{\partial t} = [R(v, t) + T(v, t)] \frac{1}{(M + \mu_{11})},$$

де $v = \frac{\partial Z}{\partial t}$;

Z – дальність перевезення при круговому рейсі.

Для змінних Z, v рівняння (1) перетвориться в систему рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{-R(v, t) - \Delta R(h_{3\%}, v, t) + T(v, t) + \Delta T(h_{3\%}, v, t) + F(h_{3\%}, v, t)}{(M + \mu_{11})}, \\ \frac{\partial Z}{\partial t} = v. \end{array} \right. \quad (2)$$

Для цієї системи рівнянь формулюється кінетичне рівняння щільності ймовірності $f(Z, v, t)$ характеристик транспортних операцій судна

$$\frac{\partial f(Z, v, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial v} \frac{R(Z, v, t)}{(M + \mu_{11})} f(Z, v, t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial v^2} \frac{T(Z, v, t)}{(M + \mu_{11})} f(Z, v, t) \quad (3)$$

Якщо в рівняннях руху (2) при розкладанні нелінійних залежностей в ряд Тейлора за ступенями приростів швидкості в околиці середньої швидкості ходу судна обмежитися розглядом перших двох членів розкладання, то стаціонарне рішення кінетичного рівняння (3) представляється широко відомою нормально-розподіленою випадковою функцією, середнє значення якої $m_v = \bar{v} - \Delta v$, де \bar{v} – швидкість ходу судна на тихій воді; Δv – втрата середньої швидкості при ході на хвилюванні. При фіксованій відстані між портами Z математичне сподівання часу транспортної операції визначається за формулою $\bar{T} = Z / \bar{v}$.

При введенні припущень, а саме: відносній малості ділянок розгону і гальмування судна, лінеаризації опору руху судна, прямолінійності руху, русі судна на хвилюванні заданої інтенсивності з постійною середньою швидкістю, маємо диференціальне рівняння $\frac{\partial Z}{\partial t} - v = 0$, вирішуючи яке визначаємо випадкову величину ходового часу за рейс

$$t_x = \frac{Z}{\bar{v} + \Delta v},$$

де Δv – зниження швидкості ходу судна, обумовлене дією вітру і хвилювання.

Ймовірність успішного переходу [6, 7]

$$p_1 = \int_{t_{x\max}}^0 f(t_x) dt_x,$$

де $t_{x\max}$ – максимальна величина ходового часу;

$f(t_x)$ – щільність ймовірності випадкової величини ходового часу.

Перехід судна із працездатного в непрацездатний або небезпечний стан можливий при виникненні аварійних ситуацій. Аварійні ситуації є результатом різних видів відмов. Факторами, що ініціюють виникнення відмов є незадовільні властивості судна, технічні неполадки (відмова технічних засобів), неправильні дії обслуговуючого персоналу/екіпажу (помилки в діях екіпажу/персоналу), несприятливий вплив навколишнього середовища (несприятливі зовнішні умови), дія вантажів, дії третіх осіб.

Відмови призводять до різних наслідків. Основними видами наслідків є: загибель судна (перекидання, затоплення, згорання, повне конструктивне руйнування), конструктивне пошкодження судна, забруднення навколишнього середовища, загибель людей (включаючи пропажу без вісті), нанесення важких тілесних ушкоджень, втрата морехідного стану і так далі. Всі ці наслідки з погляду їх дії доцільно об'єднати в наступні підсумкові категорії: персонал (загибель або травмування), матеріальні цінності – повна або часткова втрата судна або вантажу; навколишнє середовище.

Таким чином, якщо судно знаходиться в працездатному стані, то воно приносить економічний ефект судовласникові (прибуток від перевезення вантажу – для вантажного судна). Перехід судна в непрацездатний або небезпечний стан пов'язаний з наслідками аварійних подій. Ці наслідки, насамперед, визначаються витратами на ремонт, затримками або простоями судна. У разі серйозних аварій судовласник несе витрати на відновлення працездатності судна, компенсаційні виплати за втрату працездатності або загибель людини, збитки навколишньому середовищу. В цілому загальна ефективність судна визначається співвідношенням між доходами і витратами.

Завдання конструктора полягає в тому, щоб ще на початкових етапах проектування закласти такий рівень безпеки судна, при якому сумарна ефективність була максимальною (з урахуванням витрат на підвищення безпеки). На подальших етапах, проектування підсистем судна необхідно проводити з урахуванням закладених рівнів надійності.

Для розробки найбільш ефективного проекту судна з урахуванням вимог надійності і безпеки необхідно вирішити задачу синтезу в стохастичній постановці. При цьому можливо сформулювати задачу в повній або частковій стохастичній постановці.

В повній стохастичній постановці задача синтезу формулюється наступним чином [6, 7].

Знайти

$$\text{Extr ЦФ} \quad (4)$$

при наступній системі обмежень:

$$E_n(x) \geq 0, n = 1, 2, 3; \quad (5)$$

$$F_k(x) \geq [F_k], \text{ до } k = 1, 2, \dots, K; \quad (6)$$

$$PC_l[P_l] \leq [PC_l], l = 1, 2, \dots, L; \quad (7)$$

$$x \leq x_q, q = 1, 2, \dots, Q \quad (8)$$

де $E_n(x) \geq 0$ – обмеження, що забезпечують необхідний рівень ефективності судна (обмеження плавучості, місткості, ходовості);

$F_k(x) \geq [F_k]$ – обмеження безпеки – ймовірність безвідмовного виконання функціональних операцій, пов'язаних з реалізацією таких морехідних якостей судна як остійність, непотоплюваність, керованість і морехідність;

$[F_k]$ – нормативні значення цієї ймовірності, які можуть бути запропоновані класифікаційним товариством;

$PC_l[P_l] \leq [PC_l]$ – функціональні обмеження фінансових коштів на забезпечення побудови і експлуатації судна, а також компенсації можливих збитків, $[PC_l]$ – граничні значення цих засобів;

x – вектор незалежних змінних (головних елементів судна);

x_q – вектор обмежень на незалежні змінні.

Перевагою такої задачі є те, що вже на початковій стадії проектування розглядається вся сукупність функціональних операцій судна не тільки для визначення ефективності судна в цілому або окремих його операцій, але й для оцінювання надійності виконання цих операцій та залучення засобів на формування необхідного рівня безпеки плавання.

Досвід наукових шкіл кафедри теорії і проектування суден НУК свідчить про те, що всі функціональні операції судна можна формалізовано представити марківськими випадковими функціями.

Це дало можливість визначення законів розподілу випадкових величин, що фігурують в оптимізаційній задачі проектування судна, в результаті вирішення відповідних крайових задач для щільності ймовірності даних випадкових функцій.

Основою цих крайових задач є кінетичні рівняння параболічного типу (9), загальновідомі під назвою рівнянь А.М. Колмогорова. Тільки тепер увага при вирішенні цих задач зосередилася не тільки на обчисленні характеристик потоків станів відмов судна і його технічних засобів, але й на визначенні характеристик потоків грошових коштів, які приносить судно, його продуктивності та корисності.

У класі марківських випадкових функцій задача технічної стійкості судна при виконанні його функціональних операцій формулюється як крайова задача для рівнянь в частинних похідних другого порядку параболічного типу, тобто як крайові задачі для кінетичних рівнянь А.М. Колмогорова, в яких шуканими функціями є щільність ймовірності параметрів станів судна $f(y, t)$ [6–9]

$$\frac{\partial f}{\partial t} = - \sum_{j=1}^n \frac{\partial}{\partial y_j} a(x, z, y, t) f(y, t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial y_{ij}^2} b(x, z, y, t) f(y, t) \quad (9)$$

До складу цих крайових задач входять початкові умови для щільності ймовірності

$$f(y = y_0, t = t_0) = f(y_0) \quad (10)$$

і граничні умови на межах Γ_k областей допустимих станів Ω_{ck}

$$\Gamma_k(y, t) = 0. \quad (11)$$

Потім проблема параметричної надійності судна представляється як проблема невиходу зображуваних точок за межі області допустимих станів. При цьому умовна $F_k(t, y_0, t_0)$ і повна $F_k(t)$ функції надійності виконання судном функціональної операції визначаються за формулами

$$F_k(t, y_0, t_0) = \int_{\Omega_{ck}} f_k(y, t, y_0, t_0) dt; \quad F_k(t) = \int_{\Omega_{ck}} F_k(t, y_0, t_0) f_k(y_0) dt. \quad (12)$$

Для всієї безлічі функціональних операцій з підмножиною розрахункових ситуацій розрахунок ймовірності виконання операцій здійснюється за формулами [9]

$$P(A) = P(A_1 A_2 A_3 \dots A_R) \approx \prod_{r=1}^R P(A_r), \quad (13)$$

де $P(A_r) = F_r$ – ймовірність знаходження судна в r -ій області допустимих станів; $A_1, A_2, A_3, \dots, A_R$ – сукупність подій, що полягають в непорушенні обмежень технічної стійкості.

$$P(\bar{A}) \approx \sum_{r=1}^R P(\bar{A}_r), \quad (14)$$

де $P(\bar{A})$ – ймовірність протилежної події – знаходження судна в області станів відмов.

Так, наприклад, якщо протягом певного терміну служби T_c судно експлуатується в N географічних районах плавання, зустрічається з комплексом M погодних умов, зазнає L змін стану навантаження мас і виявляється за характерними ознаками порушення обмеження технічної стійкості в Q розрахункових ситуаціях, то ймовірність порушення r -го обме-

ження технічної стійкості судна Γ_r визначається за допомогою наступної формули повної ймовірності [6, 7]:

$$P_i(\tilde{A}_r) \approx \sum_{m=1}^M P(\Pi_m) \sum_{l=1}^L P(H_l) \sum_{q=1}^Q P(PC_q) P_{mlq}(H_r | \Pi_m, H_l, PC_q), \quad (15)$$

де

$$P(\Pi_m) = \sum_{n=1}^N P(\Pi_n) P(\Pi_m | \Pi_n);$$

$$\sum_{n=1}^N P(\Pi_n) = \sum_{m=1}^M P(\Pi_m) = \sum_{l=1}^L P(H_l) = \sum_{q=1}^Q P(PC_q) = 1.$$

Тут $P(\Pi_n)$ – ймовірність перебування судна в n -му районі плавання;

$P(\Pi_m | \Pi_n)$ – умовна ймовірність зустрічі судна з m -ми погодними умовами при плаванні в n -му районі;

$P(\Pi_m)$ – ймовірність зустрічі судна з m -ми погодними умовами за час

T_c ;

$P(H_l)$ – ймовірність l -го стану навантаження мас;

$P(PC_q)$ – ймовірність попадання в q -ю розрахункову ситуацію;

$P_{mlq}(H_r | \Pi_m, H_l, PC_q)$ – умовна ймовірність порушення обмеження технічної стійкості в m -х погодних умовах, при l -ому стані навантаження мас, в q -й розрахунковій ситуації.

Оцінювання економічної ефективності судна виконується за допомогою показника ефективності. При *комерційному використанні* таким показником може бути прибуток, що отримується за певний період експлуатації t

$$P_t = I_t - E_t - L_t, \quad (16)$$

де I_t – сума доходів;

E_t – сума витрат;

L_t – сума витрат на страхування і відшкодування збитків в результаті аварій, віднесених до цього ж періоду.

При визначенні ефективності за весь життєвий цикл судна доцільно використовувати показник чистого дисконтованого доходу

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{(P_t + A_t) - C_{INVt}}{(1+d)^t},$$

де A_t – сума амортизаційних відрахувань в t -й період;

t – поточний рік розрахункового періоду;

T – тривалість життєвого циклу судна;

d – ставка (норма) дисконту.

При службовому використанні суден

$$R_t = E_t + L_t. \quad (17)$$

Часткова стохастична постановка ґрунтується на наступній формулі перетворення законів розподілу випадкових величин:

$$F[P_t] = F[I_t - E_t - L_t] \quad (18)$$

або сукупності формул перетворення імовірнісних характеристик

$$PC_m[P_t] = PC_m[I_t - E_t - L_t], \quad m = 1, 2, 3, \dots, M. \quad (19)$$

Повна стохастична постановка (критерії типу "витрати – ефективність")

$$\text{ЦФ}\{PC[P_t]P\} \Rightarrow \max; \quad \text{ЦФ}\left\{\frac{PC[P_t]}{P}\right\} \Rightarrow \min, \quad (20)$$

де P – ймовірність виконання судном основної сукупності функціональних операцій.

Як видно з (20) для вирішення поставленої задачі (4–20) необхідно визначити ймовірність виконання судном основних функціональних задач. В термінах теорії надійності ця ймовірність може розглядатися як ймовірність безпечного плавання (без аварійних подій)

$$P = \prod_{i=1}^n (1 - P_{aci}),$$

де P_{aci} – ймовірність появи аварійної ситуації від i -го джерела (фактора).

При виникненні аварійної ситуації окрім ймовірності появи цієї події необхідно кількісно оцінити вартість збитків від аварії. Сучасний підхід до оцінки безпеки припускає використання для цього теорії ризику

$$R = \sum_{i=1}^n P_i C_i,$$

де C_i – можливий збиток від i -ї аварії; P_i – ймовірність виникнення i -ї аварії.

З урахуванням можливих наслідків

$$R = P_1 C_1 + P_2 C_2 + P_3 C_3,$$

де P_1, P_2, P_3 – ймовірність виникнення небезпеки для персоналу, матеріальних цінностей і навколишнього середовища відповідно;

C_1, C_2, C_3 – величина збитків для персоналу, матеріальних цінностей і навколишньому середовищу відповідно.

Ймовірність виникнення небезпеки для життя персоналу визначається як

$$P_1 = 1 - P_{оч},$$

де $P_{бч}$ – ймовірність, що характеризує безпеку людини на морі

$$P_{бч} = (1 - P_{ас}) + P_{ас} P_{лас} + P_{ас} (1 - P_{лас}) P_{СПЕ},$$

де $P_{ас}$ – ймовірність появи аварійної ситуації;

$P_{лас}$ – ймовірність ліквідації або локалізації аварійної ситуації;

$P_{СПЕ}$ – ймовірність порятунку екіпажу.

Ймовірність порятунку екіпажу при евакуації з судна можна визначити за формулою

$$P_{СПЕ} = P_{спб} + P_{СПАСС} (1 - P_{спб}), \quad (21)$$

де $P_{спб}$ – ймовірність порятунку екіпажу з використанням судових рятувальних засобів індивідуального і колективного користування;

$P_{СПАСС}$ – ймовірність порятунку екіпажу за допомогою засобів і сил аварійно-рятувальних служб.

За необхідності врахування додаткових факторів (можливості використання екіпажем бортових рятувальних засобів, засобів пошуково-рятувальних служб інших держав і так далі) вираз (21) ускладниться і набере, наприклад, вигляду

$$P_{СПЕ} = P_{спб} + P_{СПАСС} (1 - P_{спб}) + P_{СПИАСС} (1 - P_{спб}) (1 - P_{СПАСС}),$$

де $P_{СПИАСС}$ – ймовірність порятунку екіпажу за допомогою засобів іноземних аварійно рятувальних служб.

Ймовірність виникнення небезпеки для матеріальних цінностей включає ймовірність загибелі або пошкодження судна, ймовірність пошкодження вантажу. Вказану ймовірність доцільно визначати за допомогою моделей безпеки. Наприклад, ймовірність загибелі судна унаслідок конкретного виду аварії P_2 складається з ймовірності виникнення аварійної ситуації на судні P_1 , умовної ймовірності даного виду аварій P_2 і умовної ймовірності загибелі судна при цьому виді аварій P_3

$$P_2 = P_1 P_2 P_3.$$

Ймовірність виникнення аварії P_1 на конкретному судні залежить від віку судна, його водотоннажності і істотно відрізняється в різних країнах. Умовну ймовірність прямим шляхом визначити досить складно. Тому в даній роботі запропоновано використовувати дерева відмов для різних категорій АМП.

Умовна ймовірність видів аварій і загибелі судна при цих аваріях визначається в процесі моделювання функціонування судна або за статистичними даними.

Основними властивостями, втрата яких безпосередньо призводить до загибелі судна, є непотоплюваність, остійність, вибухопожежостійкість та міцність. Утрата керованості та ходовості безпосередньо не спричиняє

загибель судна, але може бути тим фактором, який ініціює розвиток аварійних пригод.

Загибель судна, як правило, супроводжується втратою вантажу. Також можлива загибель персоналу і забруднення навколишнього середовища.

Особливістю розвитку аварійної ситуації на судні є те, що фактори, які ініціюють виникнення відмов, тісно пов'язані між собою. Так зіткнення суден призводить до затоплення приміщень, розриву частини корпусних конструкцій, а енергія, яка виділяється під час удару, іскра від тертя та удару металевих конструкцій при розливі палива визиває пожежу та вибух.

Виходячи з цього, слід розглянути наступне дерево відмов (рис. 1, 2):

Результат аварії для пошкодженого судна залежить від багатьох випадкових факторів: розміру і розташування пробоїни, стану навантаження у момент аварії, інтенсивності хвилювання і вітру, дій екіпажу. Найбільш об'єктивною характеристикою рівня забезпечення непотоплюваності судна є ймовірність виживання судна після отримання пробоїни. Ця ймовірність включає наступну ймовірність:

– ймовірність затоплення кожного окремого відсіку (або групи відсіків);

– ймовірність того, що плавучість судна після затоплення буде достатньою для збереження судна;

– ймовірність того, що остійність судна після затоплення буде достатньою для попередження перекидання або небезпечного нахилу судна із-за втрати остійності або виникнення кренуючого моменту.

Ймовірність виживання судна при отриманні пробоїни повинна розраховуватися як сума ймовірності його виживання після затоплення кожного окремого (групи) відсіків, помножених відповідно на ймовірності отримання таких пошкоджень, які призводять до затоплення відповідного відсіку (групи відсіків).

Для оцінювання міцності судна використовується вираз

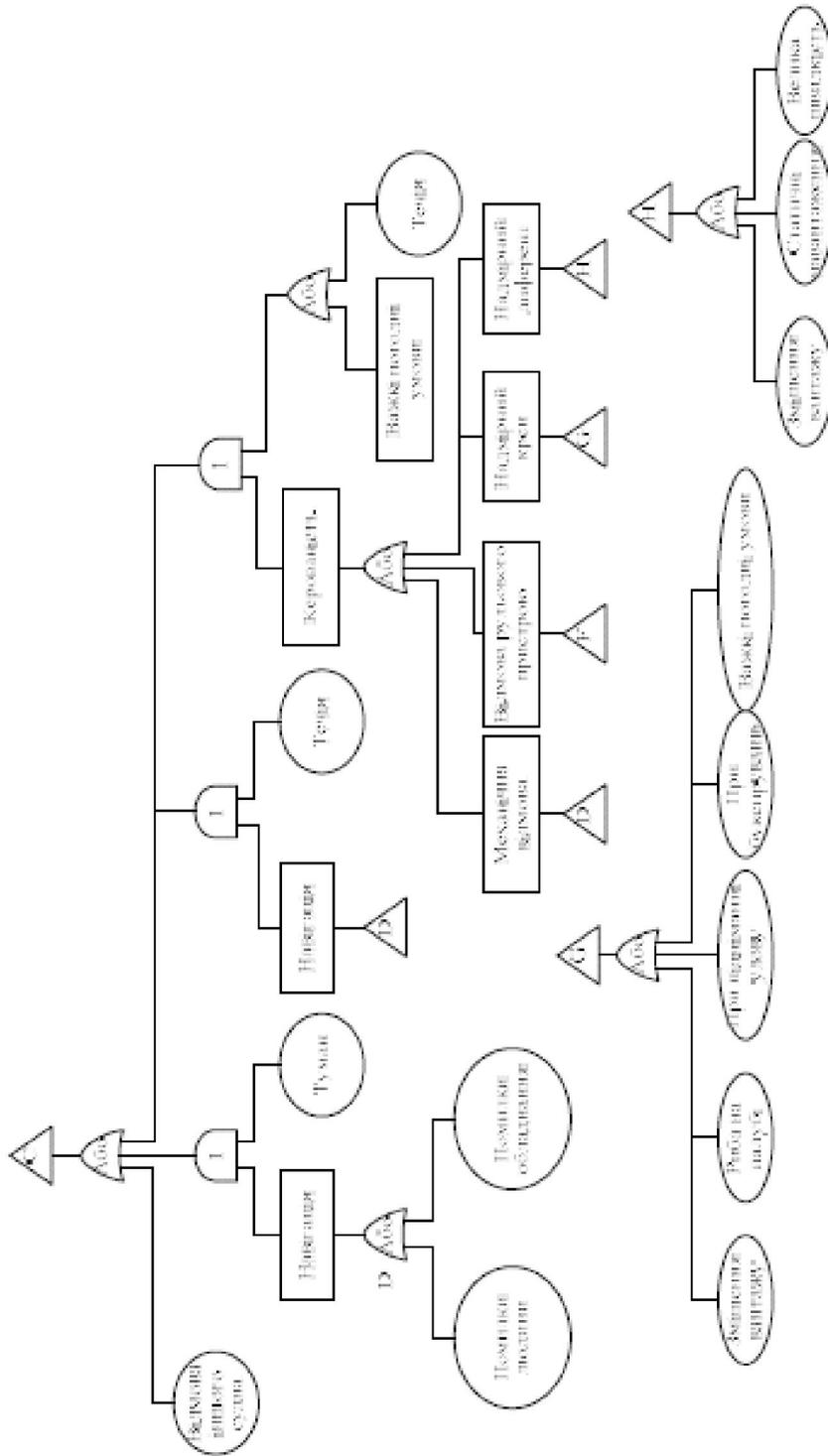
$$P_{\text{ми}} = 1 - \frac{[\sigma(t) - \sigma_0]}{[\sigma_p(t) - \sigma_0]},$$

де $P_{\text{ми}}$ – ймовірність неруйнування судна;

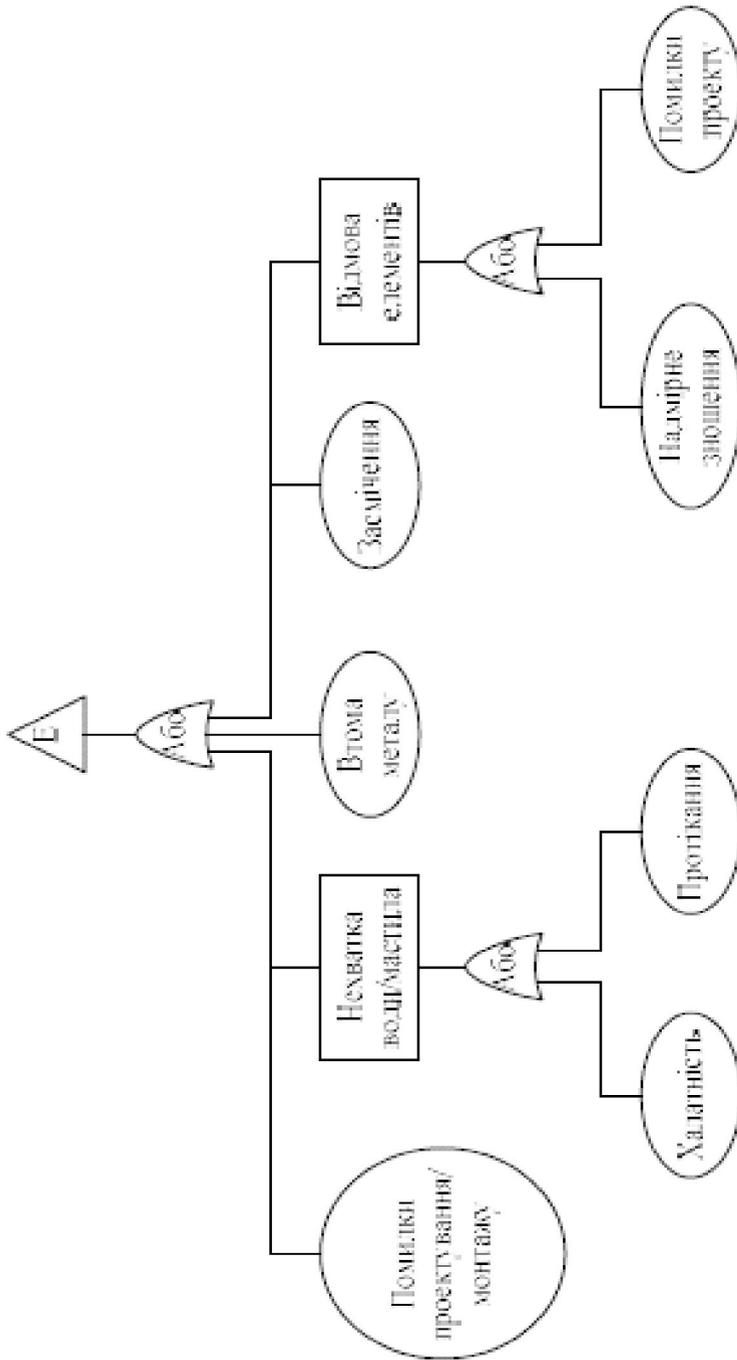
σ_0 – проектне значення напруження;

$\sigma(t)$ – поточне значення напруження від загального згину в основних перекриттях судна в залежності від часу;

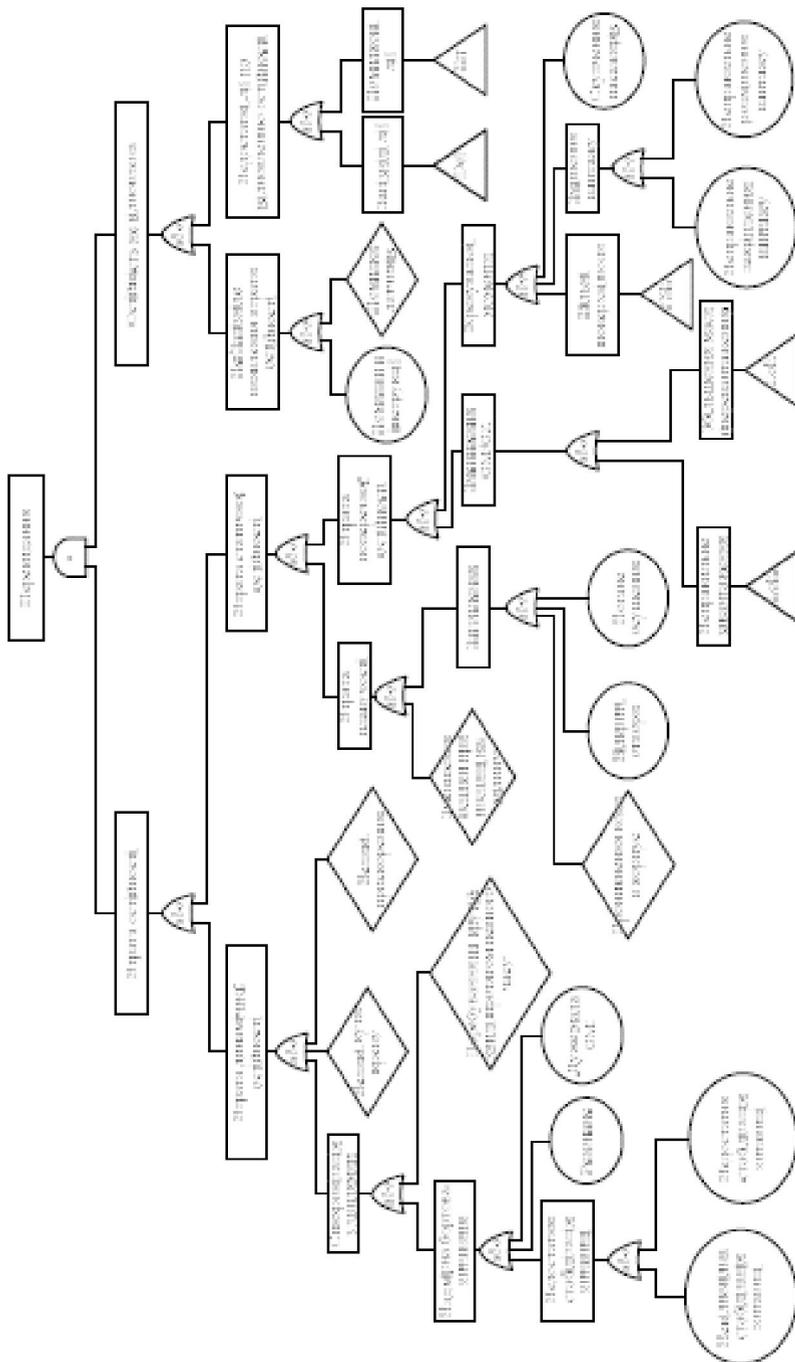
$\sigma_p(t)$ – напруження, які руйнують матеріал корпусу судна в залежності від часу.



Продовження рис. 1. Дерево відомостей при загибелі судна



Продовження рис. 1. Дерево відмов при загибелі судна



Продовження рис. 1. Дерево відмов при замібілі судна

Пожежна безпека судна може бути розрахована за формулою

$$P_{пж} = 1 - \frac{W_{п}(t)}{W_{по}},$$

де $P_{пж}$ – ймовірність виживання судна при виникненні пожежі/вибуху;

$W_{п}(t)$ – поточний відносний об'єм приміщень, які знищено пожежею або вибухом по відношенню до загального об'єму приміщень, які може витримати судно внаслідок пожежі та внутрішніх вибухів;

$W_{по}$ – максимальний відносний об'єм руйнування, який може витримати судно внаслідок пожежі та внутрішніх вибухів.

Відповідно до вказаних у табл. категорій наслідків АМП визначаються величини збитків. Аналіз показує, що найважче піддаються кількісній оцінці є два види – збитки персоналу і збитки навколишньому середовищу.

Збитки персоналу включають витрати на компенсацію і проведення заходів унаслідок загибелі і травмування людей (членів екіпажу, пасажирів, третіх осіб). Вказані збитки доцільно визначати за формулою

$$C_{гнб} = \frac{C_{ВВП}}{(N_0 - N_1)0,5} \bar{P}_{ж},$$

де $C_{ВВП}$ – річний валовий внутрішній продукт (ВВП) країни;

N_0, N_1 – чисельність населення країни на початок і кінець даного року, для якого визначено ВВП;

$\bar{P}_{ж}$ – середня тривалість життя, розрахована для року визначення ВВП, років.

Витрати, пов'язані з травмуванням персоналу можна обчислити за формулою

$$C_{тр} = C_{вн} + C_{ин},$$

де $C_{вн}$ – витрати на виплату допомоги з тимчасової непрацездатності;

$C_{ин}$ – витрати на виплату пенсій особам, що стали інвалідами.

Витрати на виплату допомоги з тимчасової непрацездатності

$$C_{вн} = \frac{\bar{Z}}{30} T_{вн} + C_{леч},$$

де \bar{Z} – середньомісячна зарплата по країні (за статистичними даними);

$T_{вн}$ – тривалість тимчасової непрацездатності (для непрацездатних постраждалих – тривалість клінічного і амбулаторного лікування), днів;

$C_{леч}$ – вартість лікування постраждалого.

Витрати на виплату допомоги особам, що стали інвалідами

$$C_{ин} = C_{гнб} K_{ин} + C_{леч},$$

де $K_{ин}$ – нормативний коефіцієнт, залежно від групи інвалідності (I група – 0,8; II група – 0,6; III група – 0,4).

Таблиця

Визначення величини збитків [10]

Категорія наслідків		Незначні	Значні	Критичні	Катастрофічні
Персонал	Компанії	Незначна травма	Серйозна травма	Поодинокий смертельний випадок	Багато смертельних випадків
	3-ої сторони	Немає пошкоджень	Незначна травма	Серйозна травма	Смертельні випадки
Навколишнє середовище		Незначне забруднення	Зареєстроване забруднення. Незначне скидання. Відсутність ефекту тривалої дії	Зареєстроване забруднення. Значне скидання. Обмежена дія на середовище	Зареєстроване забруднення. Неконтрольоване скидання. Ефект тривалої дії.
Матеріальні цінності	Компанії/судна	Незначні пошкодження. Можливий ремонт на борту судна	Пошкодження. Потрібно зайти в порт і/або тривала стоянка для ремонту	Значні пошкодження. Необхідність докового ремонту	Загибель судна
	Затримки	Незначні затримки	Затримка на один день	Затримка до одного тижня	Затримка більше одного тижня
	Репутація (статус)	Незначний збиток репутації або його відсутність	Місцевий збиток репутації (термінал, портові власті та ін.)	Збиток репутації на рівні національних властей	Значний інтерес громадськості. Утрата репутації в галузі
	3-тя сторона	Немає дії	Незначний збиток поблизу судна. Невеликий ремонт	Значний збиток 3-ій стороні поблизу судна. Тривалий ремонт	Дуже значні пошкодження власності 3-ої сторони на значній відстані від судна

Розглядаючи питання вартісної оцінки збитків навколишньому середовищу (екологічних збитків) від морського транспорту, перш за все, слід зазначити, що під екологічним збитком розуміють виражену в грошовій формі завдану шкоду навколишньому середовищу.

В більшості випадків екологічні збитки від діяльності морського транспорту пов'язані з аварійними ситуаціями розливу нафти і нафто продуктів, які нерідко викликають значне забруднення навколишнього середовища, що завдає шкоди екосистемі в цілому. Також слід враховувати, що від аварій, пов'язаних з розливом нафти, страждає не тільки тваринний

і рослинний світ. Серйозні збитки зазнають місцеві рибаки, готелі і ресторани. Крім того, з проблемами стикаються і інші галузі економіки, особливо ті підприємства, діяльність яких має потребу у великій кількості води.

Збитки від великомасштабних розливів нафти підрахувати досить складно. Вони залежать від багатьох факторів: типу розлитих нафтопродуктів, стану постраждалої екосистеми, погоди, океанських і морських течій, пори року, станів місцевого рибальства і туризму тощо. Але великі розливи нафти відбуваються досить рідко. Тому, доцільно екологічні збитки від розливу нафти розглядати при вантажних операціях танкерів і розливах палива в результаті пошкодження паливних цистерн суден інших типів.

Розмір збитків за забруднення водних об'єктів нафтою C_n може бути визначено з використанням "Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства" за формулою

$$C_n = K_{вг} K_B K_{ин} K_{дл} H,$$

де $K_{дл}$ – коефіцієнт, що враховує тривалість негативної дії шкідливих речовин на водний об'єкт при неприйнятті заходів по його ліквідації;

$K_{вг}$ – коефіцієнт, що враховує природно-кліматичні умови залежно від пори року;

K_B – коефіцієнт, що враховує екологічні фактори;

$K_{ин}$ – коефіцієнт індексації, що враховує інфляційну складову економічного розвитку;

H – базовий норматив плати для розрахунку розміру шкоди при забрудненні, визначається залежно від маси забруднюючої речовини.

При розрахунку матеріальних збитків судовласника, слід враховувати можливі результати аварії. Так, якщо в результаті аварії судно затонуло, то необхідно визначити економічні збитки від втрати судна залежно від його віку за наступною формулою:

$$C_S = \frac{C_{S0}}{\left(1 + \frac{a}{100}\right)^n},$$

де C_{S0} – економічні збитки від втрати нового судна;

n – вік судна, років;

a – постійна, може бути прийнята рівною 10.

При пошкодженні судна необхідно врахувати витрати на відновлення пошкодженого корпусу, постановку в док (за необхідності), ремонт. У початковому наближенні вартість ремонтних робіт C_P може бути визначена за формулою

$$C_P = C_K + C_{док} + C_{пер},$$

де C_K – витрати на ремонт корпусу, можуть бути приблизно оцінені як $C_K = M c_1$;

M – маса конструкцій, які потрібно замінити;

c_1 – питома вартість ремонту 1 т металу;

$C_{\text{док}}$ – вартість докових робіт $C_{\text{док}} = c_2 GRT$;

c_2 – питома вартість докових робіт;

GRT – валова реєстрова місткість судна; $C_{\text{пер}}$ – вартість переходу судна до судноремонтного заводу, включає витрати на паливо, екіпаж, можливі послуги буксирів.

Крім того, в моделі розрахунку доходів судновласника необхідно врахувати втрати експлуатаційного часу із-за виведення судна з експлуатації і, як наслідок, недоотримання прибутку.

Збиток вантажовідправникові пов'язаний з пошкодженням вантажу і може бути визначено за формулою

$$C_{\text{гр}} = \frac{B_Q Q_y}{100},$$

де Q_y – кількість пошкодженого вантажу %;

B_Q – сумарна вартість вантажу.

Указані залежності використовуються в розрахунках показників економічної ефективності судна.

Висновок. Таким чином запропонована концепція дає змогу врахувати вимоги надійності, безпеки та ефективності на етапі проектування судна. В цілому це дає змогу значно покращити якість проектних розробок та підвищити безпеку людського життя на морі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Акимов В.А. Катастрофы и безопасность / В.А. Акимов, В.А. Владимиров, В.И. Измалков. – М.: Деловой экспресс, 2006. – 392 с.
2. Романов В.Н. Системный анализ для инженеров / В.Н. Романов. – СПб.: Северо-западный государственный заочный технический университет, 2006. – 186 с.
3. Пашин В.М. Оптимизация судов / В.М. Пашин. – Л.: Судостроение, 1983. – 296 с.
4. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем / А.И. Гайкович. – СПб.: НИЦ "МОРИНТЕХ", 2001. – 432 с.
5. Панкова О.В. Визначення характеристик транспортного судна, що перевозить вантажі послідовними рейсами: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.08.03 "Конструювання та будівництва суден". – Миколаїв, 2011. – 24 с.

6. Некрасов В.А. Мореходность и техническая устойчивость судна / В.А. Некрасов // Гидродинамика корабля: Сб. науч. тр. – Николаев: НКИ, 1985. – С.61-72.
7. Некрасов В.А. Вероятностные задачи мореходности судов / В.А. Некрасов. – Л.: Судостроение, 1978. – 300 с.
8. Мартынюк А.А. Техническая устойчивость в динамике / А.А. Мартынюк. – К.: Техника, 1973. – 188 с.
9. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – М.: Наука, 1971. – 412 с.
10. Кацман Ф. Роль и место аварийного планирования в системе комплексной безопасности морской транспортировки СПГ / Ф. Кацман, С. Баскаков // Морской флот. – 2006. – № 2. – С. 38-42.

Стаття надійшла до редакції 17.11.11

УДК 629.5.01

Н.Н. Кабанова

**РЕШЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ
ХАРАКТЕРИСТИК ТРАМПОВОГО СУДНА**

Сформулирована и решена задача оптимизации главных элементов судна. Разработан алгоритм поиска экстремума функции случайных величин как стохастической задачи оптимизации эксплуатационных характеристик судна.

Ключевые слова: оптимизация, стохастическая задача, метод Пауэлла, метод Монте-Карло.

Сформульована і вирішена задача оптимізації головних елементів судна. Розроблено алгоритм пошуку екстремуму функції випадкових величин як стохастичної задачі оптимізації експлуатаційних характеристик судна.

Ключові слова: оптимізація, стохастична задача, метод Пауелла, метод Монте-Карло.

The optimization task for vessel's main elements estimation is formulated and solved. The algorithm for the random function turning-point searching is developed as a stochastic optimization of vessels' operating characteristic.

Keywords: optimization, stochastic task, the method of Powell, the Monte Carlo method.

Введение. При постановке оптимизационной задачи существенную роль играет выбор целевой функции (ЦФ), которая в свою очередь оказывает ключевое влияние на конечный результат. Исследование [1], проведенное автором, показало существенное отличие результатов оптимизации по критериям минимальных приведенных затрат и максимальной прибыли, на основании чего в качестве целевой функции было предложено использование зависимости чистой прибыли, получаемой судном от его характеристик.

В практике проектирования судов, как правило, используются так называемые детерминированные методы [2, 3], в основе которых лежит использование усредненных параметров. Поскольку условия эксплуатации трампа носят случайный характер, для их учета необходима формулировка и решение поставленной задачи в стохастической постановке.

Поскольку при задании одного критерия нет возможности обеспечить основные требования, предъявляемые к проекту, ставится вопрос о решении оптимизационной задачи в несколько этапов.

Постановка задачи. Каждый рейс судно совершает с грузом различной массы, стоимостью его доставки и расстоянием между портами.

Таким образом, данные величины являются случайными внешними параметрами оптимизационной задачи. Вместе с этим, необходимо также определение оптимальных длины, ширины, осадки, коэффициента общей полноты судна, которое должно осуществляться из соображений минимизации мощности СЭУ, определяющей основную часть эксплуатационных расходов (внутренняя задача проектирования).

В данной работе определяется приносимая судном прибыль при независимых переменных (НП): грузоподъемность и скорость. При этом для каждой фиксированной точки (НП) проводится поиск оптимальных главных элементов судна по критерию минимизации мощности.

Изложение основного материала. Ключевое влияние на конечный результат задачи оптимизации элементов судна оказывает выбранный критерий эффективности. Для трамповых судов характерна непредсказуемость условий их функционирования. В связи с этим, остро становится вопрос о необходимости учета случайных факторов, что реализуется при стохастической постановке задачи проектирования, которая сводится к преобразованию законов распределения входящих случайных величин в результирующий закон распределения прибыли (рис. 1). Как правило, для описания характера распределения исходных величин достаточно задание первых 2-х статистических моментов – математического ожидания и дисперсии.

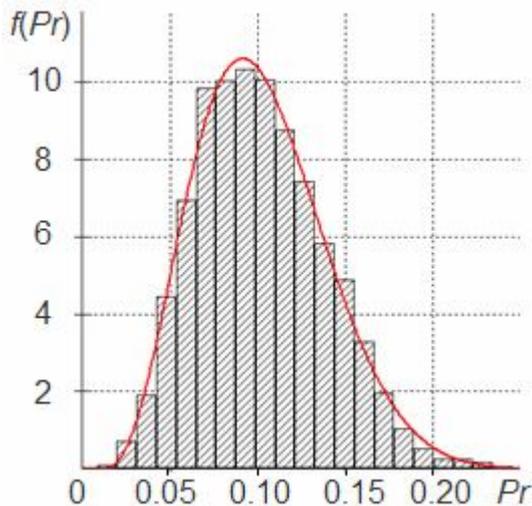


Рис. 1. Закон распределения получаемой судном прибыли:
 Pr – прибыль, получаемая в процессе эксплуатации судна, млн \$;
 $f(Pr)$ – функция плотности вероятности прибыли

На первом этапе оптимизационной задачи в качестве критерия эффективности выбрана прибыль, получаемая судном в процессе его эксплуатации. Независимыми переменными (НП) являются его грузоподъемность и скорость хода. Именно они оказывают решающее влияние на оптимизированный критерий. Кроме того, наличие всего 2 переменных обеспечивает возможность визуализации ЦФ, поскольку увеличение числа НП обращают ее в гиперповерхность, которая не поддается изображению обычными средствами. Для решения данной задачи использован метод Пауэлла. Однако поскольку задача является стохастической, для поиска экстремума каждого сопряженного направления использована полиномиальная аппроксимация с последующим дифференцированием полученной сглаживающей функции.

Как известно, наибольшей статьей расходов судна являются затраты на топливо, в связи с этим при выборе основных элементов судна необходимо руководствоваться обеспечением минимального сопротивления воды его движению. Данная схема реализована на втором этапе оптимизации, в котором НП являются длина судна (L), ширина (B), осадка (d), коэффициент общей полноты (C_b), а ЦФ – мощность СЭУ. Поиск ведется при фиксированных значениях скорости и грузоподъемности судна. Таким образом, каждой точке поверхности прибыли соответствует судно, оптимальное по критерию минимизации мощности.

Для обеспечения условий мореходности, ходкости, остойчивости и непотопляемости, на оптимизируемую функцию накладываются функциональные и тривиальные ограничения. По характеру рассматриваемая задача детерминированная, поэтому для ее решения может быть использован метод Пауэлла совместно с методом ДСК [3].

Процесс поиска решения при двухэтапной оптимизации методом Пауэлла иллюстрируется рис. 2.

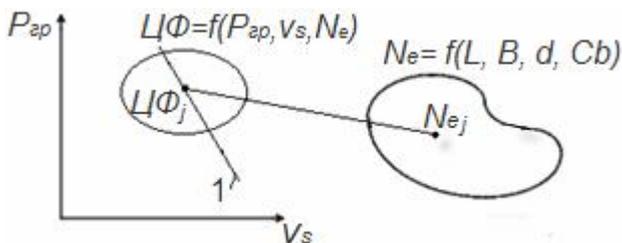


Рис. 2. Поиск оптимального решения двухэтапной задачи поиска основных характеристик трампа:

v_s – скорость хода; $P_{зр}$ – грузоподъемность судна;

L, B, d, C_b – соответственно длина, ширина, осадка, коэффициент общей полноты судна; ЦФ_{*j*} – точка на сопряженном направлении;

1 – сопряженное направление поиска решения;

N_{e_j} – оптимальное значение мощности для текущих значений v_s и $P_{зр}$.

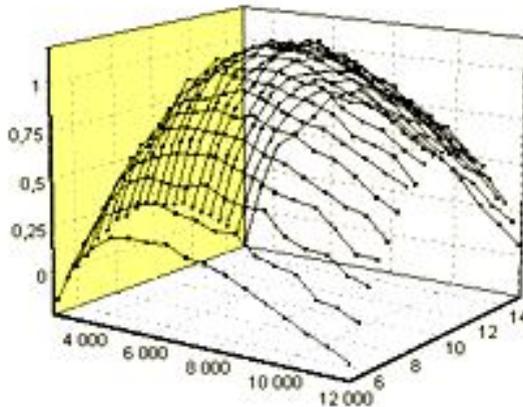
На первом уровне оптимизационная задача решается на основании построенной имитационной модели функционирования трампа.

В вероятностном имитационном моделировании оперируют не характеристиками случайных процессов, а конкретными случайными числовыми значениями параметров процессов или систем. При этом результаты, полученные в процессе имитационного моделирования рассматриваемого процесса, являются случайными реализациями. Для рассматриваемого исследования применен метод Монте-Карло в котором после проведения заданного количества испытаний получают n возможных значений искомой величины (x_i), и затем вычисляют их среднее арифметическое

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot$$

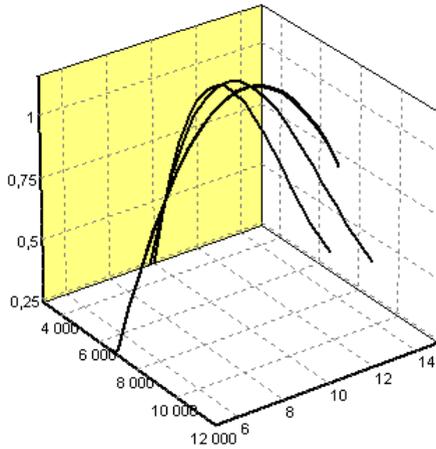
При каждой конечной серии испытаний будут получаться различные значения случайной величины и, следовательно, каждой из них будут соответствовать разные средние значения, а значит, и другая оценка математического ожидания. Очевидно, что получить точную оценку математического ожидания невозможно.

В графическом виде серия испытаний будет представлять собой кривую со множеством локальных экстремумов, в связи с чем введем понятие «эффект пилы» – возникновение колебаний относительно среднего значения функции (рис. 3).



a)

Рис. 3. Поверхность отклика ЦФ:
а) не аппроксимированной; б) аппроксимированной



б)

Продолжение рис. 3

Для решения задач многомерной оптимизации при проектировании судов, широко используется метод Пауэлла, в котором для одномерного поиска вдоль направления применяется метод ДСК. Однако к ЦФ случайных аргументов, применение данного метода затруднено. Для решения этой проблемы разработан изложенный ниже алгоритм.

В данном алгоритме процесс отыскания минимального значения целевой функции при одномерном поиске вдоль сопряженного направления выполняется в следующей последовательности: определение интервала поиска оптимума → трассировка целевой функции → аппроксимация полученного множества точек полиномом 3-й степени → поиск точек экстремума полинома → выбор оптимальной точки путём анализа экстремальных точек полинома и граничных точек интервала аппроксимации.

Для примера рассмотрим подробно поиск минимального значения целевой функции 2-х переменных (скорости и грузоподъемности) вдоль сопряженного направления (рис. 4).

Исходными данными при поиске оптимума ЦФ вдоль сопряженного направления являются:

- начальная точка, заданная координатами P_{ep0}, v_{s0} ;
- минимально и максимально допустимые значения независимых переменных $(P_{ep\min}, v_{s\min}, P_{ep\max}, v_{s\max})$;
- вектор направления (dx, dy) .

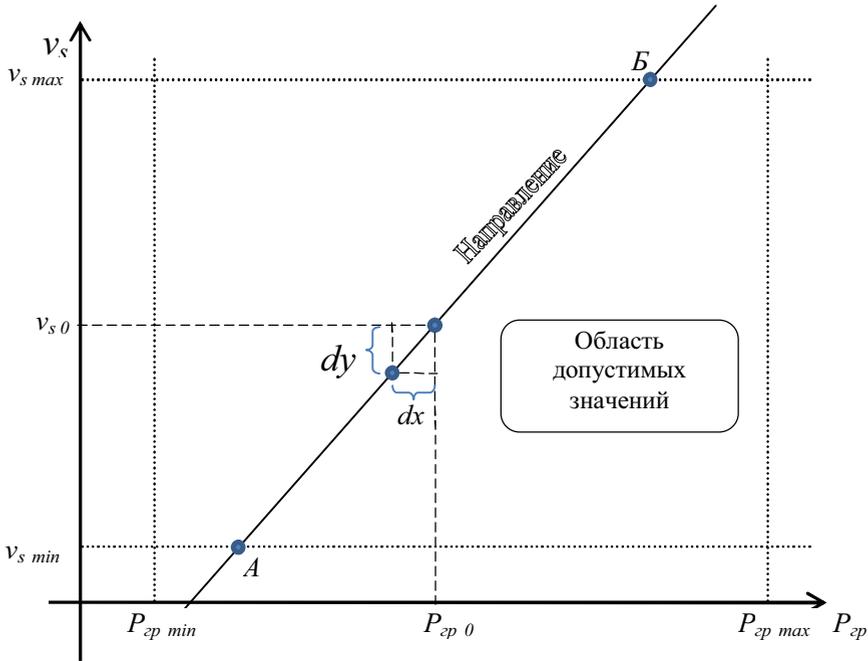


Рис. 4. Поиск экстремума j – направления метода Пауэлла

На первом этапе задача заключается в определении интервала, на котором будет осуществляться поиск. Этим интервалом является отрезок прямой сопряженного направления, ограниченный точками А и Б, то есть, точками пересечения прямой направления с границами ОДЗ. Для поиска координат точек А и Б воспользуемся уравнением прямой

$$y = ax + b, \quad (1)$$

где $a = \operatorname{tg} \alpha$, α – угол наклона прямой относительно положительного направления оси абсцисс.

Вместе с тем тангенс угла наклона определяется как отношение противолежащего катета прямоугольного треугольника к прилежащему

$$\left(a = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} \right).$$

Из (1) следует

$$b = y - \frac{dy}{dx} x.$$

Начальная точка (НТ) имеет координаты $x_0 = P_{сп0}$ и $y_0 = v_{s0}$.

Границы исследуемой области характеризуются следующими координатами, приведенными в таблице 1.

Таблиця 1

Ограничения при условии $dx \neq 0$ и $dy \neq 0$

Ограничение	Координаты точки пересечения с направлением	
	X	Y
$y = v_{s \min}$	$\frac{v_{s \min} - b}{a}$	$v_{s \min}$
$y = v_{s \max}$	$\frac{v_{s \max} - b}{a}$	$v_{s \max}$
$x = P_{ep \min}$	$P_{ep \min}$	$aP_{ep \min} + b$
$x = P_{ep \max}$	$P_{ep \max}$	$aP_{ep \max} + b$

В частных случаях (когда сопряженное направление параллельно одной из осей), координаты конечных точек интервала трассировки определяются согласно таблицам 2 и 3.

Таблиця 2

Ограничения при условии $dx = 0$ и $dy \neq 0$

Ограничение	Координаты точки пересечения с направлением	
	X	Y
$y = v_{s \min}$	P_{ep0}	$v_{s \min}$
$y = v_{s \max}$	P_{ep0}	$v_{s \max}$

Таблиця 3

Ограничения при условии $dx \neq 0$ и $dy = 0$

Ограничение	Координаты точки пересечения с на- правлением	
	X	Y
$x = P_{ep \min}$	$P_{ep \min}$	v_{s0}
$x = P_{ep \max}$	$P_{ep \max}$	v_{s0}

Для определения граничных точек направления, необходимо из всех точек, определяемых по таблицам 1-3, выбрать две, находящиеся на границе ОДЗ.

Для исследования j -го направления поиска, необходимо осуществить его трассировку (определение значений функции в дискретном наборе точек), что сопряжено с разбиением на интервалы $(\vec{s})_i$. Задача решается при известных A и B , а также количестве интервалов разбиения (n)

$$\vec{s}_i = \vec{r}_A + \vec{\delta} \cdot i, \quad (2)$$

где $\vec{\delta}$ – вектор приращений; i – номер интервальной точки;

\vec{r}_A – радиус-вектор точки A .

В формуле (2)

$$\vec{\delta} = \frac{\vec{r}_B - \vec{r}_A}{n},$$

где \vec{r}_B – радиус-вектор точки B .

Таким образом, формируется массив значений анализируемого направления. После чего проводится аппроксимация полученных данных полиномом 3 степени

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (3)$$

Данная операция связана с необходимостью сглаживания флуктуационных скачков, вызываемых влиянием случайных величин, входящих в ЦФ. Однако, при аппроксимации случайной функции, присутствует риск сдвига оптимума при допустимом значении среднеквадратичного отклонения [4]. Это связано с влиянием больших значений флуктуации случайной функции. Для решения этой проблемы в использовании метода Монте-Карло, достаточно увеличить число испытаний. Анализ показал, что для выбранной ЦФ суммарная погрешность расчетов (рис. 5) при 8000 опытов метода Монте-Карло составляет порядка 5 %, при дальнейшем увеличении опытов, погрешность существенно не снижается.

Таким образом, при сохранении достоверного уровня отклонения аппроксимирующей зависимости от реальной функции, достигается несмещаемость оптимума.

Завершающим этапом является нахождение экстремума полинома. Для этого необходимо взять производную от выражения (3), приравнять ее к нулю и найти корни полученного уравнения.

Производная аппроксимирующего полинома

$$y = 3a_3x^2 + 2a_2x + a_1. \quad (4)$$

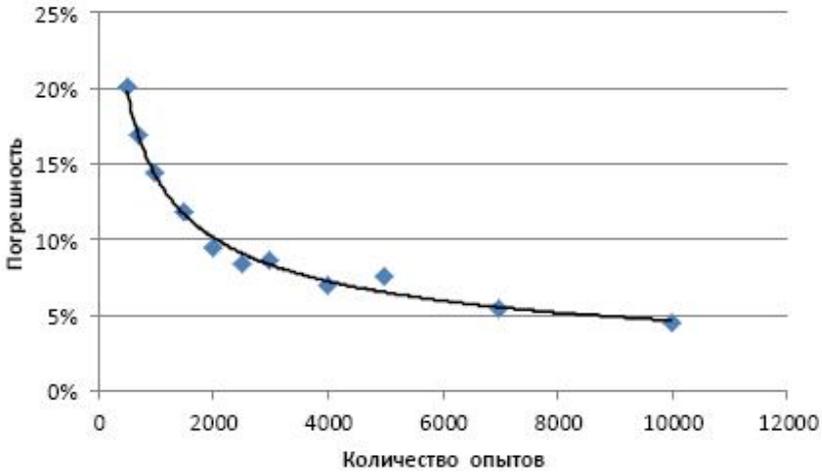


Рис. 5. Залежність погрешності від кількості спроб в методі Монте-Карло

Приравнивая (4) к нулю, получаем квадратное уравнение, корни которого определяются как

$$x_1 = \frac{-2a_2 + \sqrt{d}}{6a_3}, \quad x_2 = \frac{-2a_2 - \sqrt{d}}{6a_3},$$

где $d = 4a_2^2 - 12a_1a_3$ – дискриминант уравнения.

После нахождения x_1, x_2 выполняется поиск значения, характеризующего экстремум j -го направления

$$x_{opt} = \text{extr}(x_1, x_2, f(A), f(B)),$$

где $f(A), f(B)$ – значения ЦФ на j -м направлении на границах ОДЗ.

В качестве решения принимается точка, лежащая в ОДЗ и значение целевой функции в которой экстремально.

Вышеизложенный алгоритм реализован в разработанном автором программном продукте TrampCargoShip (рисунок 6). Пример решения с его помощью задачи оптимизации характеристик судна указан в табл. 4.

В таблице 4 $L, B, T, H, C_b, C_m, C_w, eps, \tau, h_{мц}, h_{мц}/B, \theta_{\max}, \theta_{\text{зак}}, H/T, S_{0^{\circ}-30^{\circ}}, S_{30^{\circ}-40^{\circ}}, S_{0^{\circ}-40^{\circ}}, K$ – соответственно длина, ширина, осадка, высота борта, коэффициенты общей полноты, полноты мидельшпангоута, полноты ватерлинии, невязка уравнения плавучести, период бортовой качки, метацентрическая высота, максимум диаграммы статической остойчивости (ДСО), угол заката ДСО, площадь ДСО между 0° и 30° , 30° и 40° , 0° и 40° , критерий погоды.

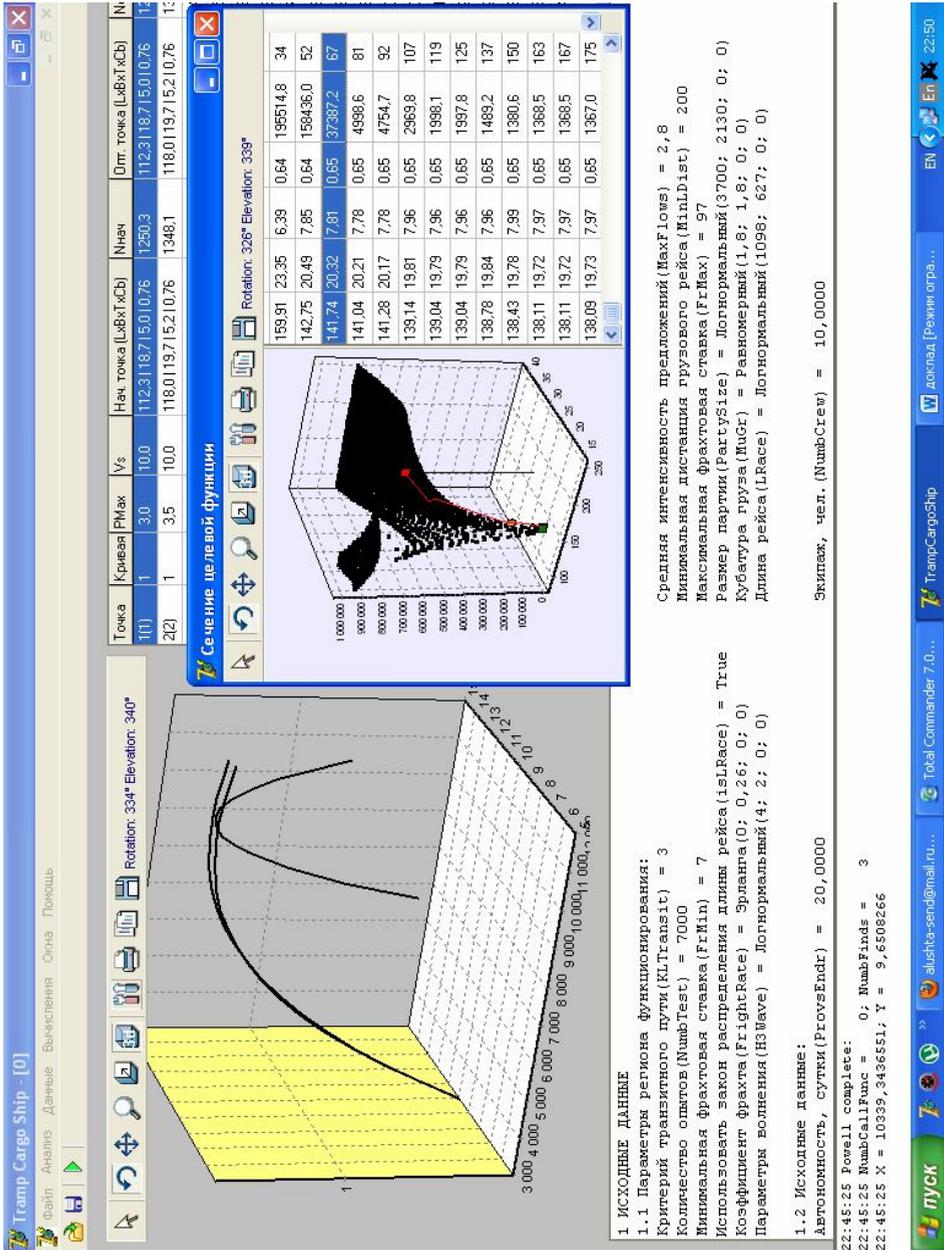


Рис. 6. Интерфейс программы «TrampCargoShip»

Таблиця 4

Значения оптимизированных характеристик судна

№	Величина	Значение	Минимум	Максимум
1	L	117,5	80	350
2	B	17,15	10	50
3	T	7,03	4	18
4	C_b	0,71	0,65	0,82
5	L/B	6,85	5	7
6	B/T	2,44	2	4
7	C_m	0,984	0,85	0,998
8	C_w	0,8050	0,68	0,85
9	eps	0,0975	-0,3	0,3
10	τ	14,9415	12	15
11	$h_{m\zeta}$	0,84	0,15	5
12	$h_{m\zeta}/B$	0,049	0,03	0,05
13	θ	50	30	-
14	θ	90	60	-
15	H/T	1,57	1,2	1,8
16	$S_{0^{\circ}-30^{\circ}}$	0,14	0,055	-
17	$S_{30^{\circ}-40^{\circ}}$	0,14	0,03	-
18	$S_{0^{\circ}-40^{\circ}}$	0,27	0,09	-
19	K	4,19	1	-

Значения таблицы 4 соответствуют судну со скоростью в 12,3 узл. при мощности СЭУ 2046 кВт, грузоподъемностью 7064 т, водоизмещением 10202 т.

Выводы

1. Для трамповых судов характерна случайность факторов их эксплуатации. В связи с этим, требуется стохастическая постановка оптимизационной задачи поиска основных элементов судна, для решения которой могут быть использованы аппроксимационные методы, обеспечивающие возможность поиска глобального экстремума зашумленной поверхности ЦФ.

2. Для решения задачи определения основных элементов судна предложен алгоритм оптимизации, обеспечивающий удовлетворение нескольким критериям эффективности стохастической задачи проектирования судна.

3. Рассмотренная методика, основанная на совместном решении внутренней и внешней задач проектирования, учитывающая случайность условий функционирования, ориентирована на создание заведомо конкурентоспособного трампового судна. Разработанный на основе приведенного алгоритма программный продукт может найти применение в проектных организациях, а также в судоходных компаниях при выборе лучших представителей флота для района с заданными условиями эксплуатации, с целью получения максимально возможной прибыли.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Некрасов В.А., Микоша Н.Н. Задача проектирования судна для условий рыночной эксплуатации // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2006. – № 2 (407). – С. 3-10.
2. Бронников А. В. Проектирование судов: Учебник. –Л.: Судостроение, 1991. — 320 с.
3. Вашедченко А.Н. Автоматизированное проектирование судов: Учебное пособие. – Л.: Судостроение, 1985. – 164 с.
4. Волгин Н.С, Махров И.В., Юровский В.А. Исследование операций. – Л.: ВМА, 1981. – 280 с.

Стаття надійшла до редакції 17.11.12

УДК 629.5.01

А.С. Потравко

**МЕТОДЫ И КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ**

Приведен обзор методов оптимизации и критериев эффективности, использовавшихся в проектировании судов.

Ключевые слова: оптимизация, критерий эффективности, проектирование транспортных судов.

Наведено огляд методів оптимізації та критеріїв ефективності, що використовувались у проектуванні суден.

Ключові слова: оптимізація, критерій ефективності, проектування транспортних суден.

The review of methods of optimization and efficiency criteria used in the design of transport vessels.

Keywords: optimization, the criterion of effectiveness, transport vessels' design.

Постановка проблемы. В условиях рыночной экономики судовладелец заинтересован в максимально возможной эффективности работы судна, характеризующейся прибылью. Данную проблему призвана решить оптимизация основных характеристик судна еще на стадии его проектирования. Задача усложняется неопределенностью исходных данных по эксплуатации судов, что может привести к дополнительному экономическому риску. Поэтому актуально исследование в области оптимизации при проектировании транспортных судов.

Цель настоящей работы. Анализ методов и критериев оптимизации при проектировании транспортных судов.

Изложение основного материала. К настоящему времени сделано немало попыток решения задачи определения основных характеристик судна как экстремальной задачи математического программирования. Доклад, представленный И.Г. Бубновым в 1916 году в обществе морских инженеров о методе определения главных размеров проектируемого судна [1], представляющий метод оптимизации в линейной формулировке, явился в дальнейшем определением нового направления в развитии проектирования судов. Исходная задача состояла в нахождении таких параметров размерений судна-прототипа, при которых можно было бы получить наименьшее водоизмещение или стоимость, либо понижение эксплуатационных расходов нового судна. Модель И.Г. Бубнова – прообраз современных моделей оптимизации элементов, первые из которых появились спустя полвека после публикации вышеупомянутого доклада.

Основным в теории проектирования судов является вариантный метод оптимизации, появившийся в начале XX века. В.Л. Поздюнин оформил его в виде способа совокупного определения водоизмещения и элементов судна. В основу вариантного метода положен выбор наилучшего варианта судна из ряда заранее рассчитанных вариантов с систематически меняющимися элементами. По мере увеличения оптимизируемых элементов трудоемкость расчетных и графических работ резко возрастает и затрудняется анализ результатов. Многие отечественные и зарубежные работы посвящены математическим методам оптимизации элементов судов и использованию ЭВМ для оптимизации вариантным методом.

Постепенно входит в практику проектирования программная оптимизация. Задача формируется таким образом: необходимо найти такое сочетание элементов, при которых функция критерия эффективности судна достигает минимума (максимума) при одновременном выполнении требований к его качествам.

Многие, особенно ранние, модели ограничиваются оптимизацией размерений и тех или иных коэффициентов полноты. Это предопределяет приближенный характер используемых в них зависимостей и может быть объяснено начальным этапом развития математических моделей. Позднее появляются модели, содержащие в оптимизируемых элементах такие, без которых невозможна достоверная оценка остойчивости, удифферентовки, вместимости и других качеств судна.

Расчетные процедуры практически всех моделей построены по принципу прямых расчетов – на каждом шаге оптимизации по заданным элементам рассчитываются параметры судна, условия-ограничения и критерии эффективности.

Для многих задач, особенно зарубежных, характерно использование достаточно надежных методов безусловной оптимизации, причем, как правило, не требуется расчета производных функций критерия и ограничений. Это методы Хука и Дживса, Пауэла, Нелдера и Мида, Розенброка и других методов. При использовании указанных методов исходная задача с ограничениями сводится к задаче безусловной оптимизации с помощью штрафных функций.

Применяется также метод аппроксимирующего программирования (метод последовательной линеаризации), который нашел применение и в отечественной практике. К его недостаткам можно отнести большой объем вычислений в детальных методах расчета ограничений и критерия эффективности. Объем вычислений значительно сокращается при использовании модифицированного метода опорной гиперплоскости, также основанного на линейной аппроксимации.

Так, одна из первых отечественных моделей, предназначенная для оптимизации элементов сухогрузных судов, танкеров и судов для перевозки навалочных грузов, предложенная В.М. Пашиным [2], в качестве критерия эффективности использовала удельные приведенные затраты.

Оптимизация осуществлялась предложенным М.Н. Рейновым методом, названным покоординатно-аппроксимационным.

В американской модели оптимизации грузовых судов, применимой и к наливным судам [2], в качестве метода оптимизации использовался метод экспоненциального случайного поиска. При конечном числе циклов значения критерия эффективности и вектор элементов являются случайными. Имеющиеся экспериментальные данные позволяют определить число циклов, обеспечивающих заданную степень приближения к оптимуму.

Оптимизация основных характеристик судна относится к классу задач нелинейного программирования. Для нахождения оптимального решения необходимо организовать алгоритм оптимизации. Среди нелинейных методов можно выделить методы решения задачи без ограничений (безусловная оптимизация) и с ограничениями (условная оптимизация).

А.В. Бронников в своей работе [3] сделал вывод о необходимости использования в процессе разработки проекта технических и эксплуатационных показателей. Однако при отборе наилучшего варианта технико-эксплуатационных показателей недостаточно, поскольку ни один из них и никакая комбинация таких показателей не может быть принят в качестве единственного критерия, гарантирующего оптимальность принимаемого варианта. Таким критерием может быть только показатель экономического характера.

В качестве критерия эффективности в отечественном проектировании до 90-х годов прошлого века использовались приведенные затраты, удельные приведенные затраты и уровень рентабельности. В зарубежных работах и более поздних работах в СНГ применяются критерии: фактор возмещения капитала, капиталовложения, необходимая фрахтовая ставка, приведенная сумма чистого дохода, максимум прибыли, дисконтированные затраты, рентабельность инвестиций, выровненная ставка операционного дохода на капитал, приведенная стоимость, чистая текущая стоимость инвестиций, внутренняя норма прибыли, критерий в форме разности совокупного дохода и операционных расходов и обобщенный критерий чистой текущей стоимости, отнесенной к инвестициям, и внутренней нормы прибыли [2; 4].

Необходимо отметить большой вклад в разработку критериев эффективности следующих отечественных исследователей: В.М. Пашина, А.В. Бронникова, И.Г. Захарова, А.А. Нарусбаева, Н.М. Азаровой, А.И. Ракова, В.А. Некрасова, Н.Н. Микоши, М.В. Войлошникова.

В соответствии с законом Украины «О предпринимательстве», в качестве функции цели деятельности любого предприятия, в том числе и судов, должно быть получение прибыли от производства товаров, услуг, торговли в виде разницы годового дохода и годовых эксплуатационных расходов (или себестоимости).

Таким образом, в дальнейшем при проектировании судов, предназначенных для эксплуатации в условиях рыночной экономики, в качестве функции цели следует рассматривать прибыль при эксплуатации будущего судна.

При проектировании транспортных судов не всегда располагают достоверными данными по будущим грузопотокам, поэтому необходимо создание методов оптимизации основных характеристик судна в условиях неполной информации или полной неопределенности.

С.А. Добышем предложен подход к оптимизации основных параметров транспортных судов в условиях неполной информации [5]. Он предложил разбивать варианты реально возможных в перспективе условий на стратегии и в последствии сравнивать их по критерию „минимум экономического риска“.

Предложенный подход позволит в определенной степени компенсировать недостоверность исходной информации и уменьшить неизбежные дополнительные расходы, связанные с отличием фактических условий от прогнозируемых.

Представляет интерес метод оптимизации энергетических систем в условиях отсутствия достоверной информации, предложенный Л.С. Беляевым [6]. Этот метод предусматривает выбор предварительного сочетания исходных данных и анализ предварительных расчетов. Затем составляется и анализируется матрица, содержащая отобранные варианты решений и вероятностные ситуации. Для решения предложенной матрицы используются следующие критерии: критерий Вальда (минимаксных затрат или максиминной полезности), Лапласа (минимум среднеарифметических затрат), Сэвиджа (минимаксный риск), Гурвица („пессимизм-оптимизм“), обобщенный критерий (используются наиболее характерные оценки вариантов). Выбор рационального варианта происходит по одному из критериев: максимум или минимум затрат для данного варианта, среднеарифметические затраты, максимум значения экономического риска (перерасхода).

Вывод. В настоящее время существует большое число критериев эффективности транспортных судов, пользуясь которыми не удастся получить однозначное оптимальное решение.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бубнов И.Г. *Об одном методе определения главных размеров проектируемого судна: Избранные труды.* – Л.: Судпромгиз, 1956.
2. Пашин В.М. *Оптимизация судов.* – Л.: Судостроение, 1983. – 296 с.

3. *Бронников А.В. Выбор критериев для определения элементов транспортных судов в процессе проектирования. Общие вопросы проектирования судов: Материалы по обмену опытом. – Вып. 199. Научно-техническое общество судостроительной промышленности. – Л.: Судостроение, 1973. – С. 63-72.*
4. *Войлошников М.В. Морские ресурсы и техника: эффективность, стоимость, оптимальность. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2002. – 586 с.*
5. *Добыши С.А. Об одном подходе к оптимизации основных параметров транспортных судов в условиях неполной информации. Общие вопросы проектирования судов: Материалы по обмену опытом. – Вып. 199. Научно-техническое общество судостроительной промышленности. – Л.: Судостроение, 1973. – С. 86-91.*
6. *Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1978. – 126 с.*

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 629.5.015.14

А.И. Раков, В.В. Жибоедов

ОЦЕНКА РАЙОНОВ ПЛАВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ РИСКА

Проаналізовано безпеку малих морських суден і визначений найбільш важкий вид аварій на основі статистики аварійності у світовому флоті. Розглянуто основні критерії, відповідальні за безпеку експлуатації судна, і визначений зв'язок цих критеріїв на основі використання теорії ризику з районами експлуатації малих суден.

Ключові слова: *мали морські судна, теорія ризику, аналіз остійності, діаграма статичної остійності, райони плавання.*

Проанализирована безопасность малых морских судов и определён наиболее тяжёлый вид аварий на основе статистики аварийности в мировом флоте. Рассмотрены основные критерии, отвечающие за безопасность эксплуатации судна, и определена связь этих критериев на основе использования теории риска с районами эксплуатации малых судов.

Ключевые слова: *малые морские суда, теория риска, анализ остойчивости, диаграмма статической остойчивости, районы плавання.*

Safety of small sea vessels is analysed and the heaviest kind of accidents on the basis of statistics of breakdown susceptibility in world fleet is certain. The basic criteria responsible for safety of operation of a vessel are considered and connection of these criteria on the basis of use of the theory of risk with areas of operation of small vessels is certain.

Keywords: *small sea vessels, the theory of risk, the analysis of stability, the diagram of static stability, areas of navigation*

Актуальность проблемы. Анализ положения в судостроительной отрасли в мире показывает, что рост потребности в судах малых размеров сохраняется на уровне 4-5 % ежегодно. На сегодняшний день эта группа судов составляет основу всего обслуживающего флота и является достаточно специфической частью судостроительной отрасли.

Для большинства стран поддерживающих Ассамблею Межправительственной морской организации (ИМО), "малой мерой" является длина судна с верхним пределом 24 м или 80 футов. На данном утверждении базируются, как Правила классификации и постройки малых судов Регистра Украины, так и Правила классификации Регистра России.

Интенсивное развитие судостроения, стремительное изменение экономических и социальных факторов заставляют по-новому относиться к архитектурным решениям современных судов. На сегодняшний день самым традиционным и при этом самым динамичным, в смысле развития архитектуры, типом морских судов являются малые морские суда.

Повышенное внимание к малым судам связано и с возрастанием роста портовых хозяйств, пассажирских перевозок, промышленного рыболовства.

Постановка проблемы. Считается, что эксплуатация судов относится к высокому классу риска, это обуславливается спецификой работы и тяжелыми условиями эксплуатации и особенно это касается малых морских судов различного назначения. Поэтому необходимо обеспечение и поддержание соответствующего уровня безопасности.

Для подтверждения этого утверждения можно обратиться к статистике аварий малых морских судов. Общая классификация аварий на морском транспорте предусматривает достаточно развитую систему категорий аварий в зависимости от причин их возникновения, но в большинстве случаев всё сводится к нескольким основным категориям – это отказ главных двигателей, столкновения, посадка на грунт, затопление и опрокидывание, пожары и взрывы.

Изложение основного материала. Применительно к малым морским судам получить такие статистические данные по авариям достаточно затруднительно, так как эти суда в основном находятся под наблюдением местных органов управления, которые не всегда предоставляют полную информацию о причинах аварий и проводят детальное расследование.

Согласно существующих статистических данных Александрова М.Н. приведенных в работе [1] гибель судов валовой вместимостью от 100 до 500 по причине потери остойчивости составляет 49 % от общего числа погибших судов (данные за 1978-1979 г.).

Если обратиться сообщениям "Marine Accident Investigation Branch" (Морское отделение исследования несчастных случаев", Великобритания) от 2002 года (см. табл. 1). За период с 1992 по 2000 было зарегистрировано 5138 аварий и аварийных происшествий с малыми рыболовными судами длиной от 7 до 24 м при этом 705 рыболовных судов затонули в результате затопления отсеков и потери остойчивости, 153 судна были потеряны безвозвратно, 61 судно затонуло в результате потери остойчивости и при этом 70 % всех моряков на этих судах погибло [2].

Основными причинами потери судов из за потери остойчивости являются: работа в условиях на которые судно не было рассчитано, заливание внутренних помещений через открытые отверстия в корпусе и негерметичность переборок, дефекты связанные с проектом судна, перегруз основных промысловых устройств при выборке тралов, перегруз самого судна уловом, зацепление за донные препятствия, отсутствие знаний у капитана или игнорирование ограничений по возможностям своего судна из за коммерческой выгоды.

Таблиця 1

*Численность аварийных случаев с рыболовными судами
по данным МАИВ за 1992-2000 годы*

Год	Общее количество аварий и несчастных случаев с экипажем		Категории аварийных случаев					
	общее количество аварий	несчастные случаи с экипажем	авария главных двигателей	посадка на мель	столкновения судов	пожары и взрывы	загорание и потеря остойчивости	другие аварии
1992	618	477	270	51	31	19	103	3
1993	646	536	307	61	42	20	95	11
1994	653	530	321	55	31	17	95	11
1995	688	586	384	58	34	10	78	22
1996	606	515	323	61	31	19	75	6
1997	582	465	316	43	26	17	57	6
1998	489	395	243	40	20	9	72	11
1999	447	378	233	32	23	15	64	11
2000	409	330	173	41	26	16	66	8
Всего	5138	4212	2570	442	264	142	705	89

По заключению специалистов МАИВ существует связь между экономическим состоянием промышленности и степенью обеспечения безопасности на судах. Во время хорошего лова рыбы и высоких цен на неё уровень безопасности возрастает, а при снижении уровня доходности (1995-1997 г.) рыбаки берут на себя чрезвычайно большие риски выраженные в неуккомплектованности судов, слабой подготовке моряков и др. Несоблюдение хотя бы одной, даже незначительной позиции в требованиях к обеспечению безопасности приводило на практике к целой цепочке нарушений и в конечном счете к гибели судна. В отчете так же указано что 705 судов это небольшая часть всех зарегистрированных случаев аварий с малыми промысловыми судами. Исходя из этого и основываясь на подобных сообщениях по аварийности "Transportation Safety Board of Canada" (Совет по безопасности транспорта Канады), а также на многочисленных протоколах расследований МАИВ аварийных случаев с рыболовными

судами, можно сделать вывод, что наиболее тяжелым видом аварии для малых морских судов является потеря остойчивости.

Целью данного исследования является определение связи критериев безопасности с районами плавания проектируемого малого морского судна на основе использования инструментов теории риска.

При современном уровне проектирования таких сложных сооружений, как судно проектировщики всё чаще прибегают в работе к анализу риска и возникновения возможных аварийных ситуаций в процессе эксплуатации. Соответствующие решения по данной проблеме были разработаны в нормативных международных документах ИМО. В частности на семьдесят четвертой сессии Морского Комитета Безопасности (2001) и на сорок седьмой сессии Морского Комитета Защиты Окружающей среды (2002) были одобрены Руководящие принципы для Формальной Оценки Безопасности (FSA), которые в свою очередь были использованы для разработки рекомендаций ИМО изложенных в MSC/Circ.1023 - MEPC/ Circ.392.

На сегодняшний день существуют различные методы количественного определения уровня риска. В некоторых случаях используют величины вероятности наступления рискового события или различные шкалы риска [3, 4].

В первом случае количественное значение уровня риска определяется выражением

$$R = C_n \cdot P,$$

где C_n – стоимостная величина потерь;

P – вероятность воздействия опасности или наступления рискового события.

Поскольку судно подвергается различным видам риска то формула может быть представлена в следующем виде:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \left(\sum_{j=1}^k a_{ik} \cdot C_k \right),$$

где P_i – вероятность воздействия i -й опасности;

a_{ik} – весовой коэффициент последствия при воздействии i -й опасности;

C_k – стоимость k -го последствия аварии;

i – категория опасности;

k – категория ущерба.

Наиболее значимой в данном случае величиной является величина вероятности воздействия – P_i . Определим необходимую связь между вероятностью воздействия опасности P_i с характеристиками малого судна.

Обратимся к действующим на сегодняшний день нормативным документам, а именно Кодексу остойчивости неповреждённых судов всех типов, на которые распространяются документы ИМО (принятый в 1993 году, Резолюция А.749(18)) и действующим Правилам Регистра судоходства Украины. Приведенные в указанных документах критерии остойчивости можно разделить на две группы: первая группа требований относится к определению предельно допустимых внешних сил и моментов воздействующих на судно в процессе эксплуатации; и вторая группа требований – определение динамически допустимых восстанавливающих моментов судна характеризуемых диаграммами статической или динамической остойчивости. Определяющим критерием, который влияет на остойчивость малого судна, является диаграмма статической остойчивости (ДСО), выражающая работу восстанавливающего момента судна.

Для сравнения в табл. 2 приведены характеристики ДСО по Правилам Регистра в сравнении с правилами ИМО. Здесь можно отметить, что требования Правил Регистра более жесткие, чем требования ИМО.

Таблица 2

Нормирование диаграммы статической и динамической остойчивости

Параметры	θ	Правила Регистра Украины	ИМО
l_{θ}	при $\theta = 30^{\circ}$	$l_{\theta} \geq 0,25$	$l_{\theta} \geq 0,20$
	при $\theta = 60^{\circ}$	$l_{\theta} \geq 0$	$l_{\theta} \geq 0$
d_{30} , м. рад.	до $\theta = 30^{\circ}$	$d_{30} \geq 0,055$	$d_{30} \geq 0,055$
d_{40} , м. рад.	до $\theta = 40^{\circ}$	$d_{40} \geq 0,090$	$d_{40} \geq 0,090$
$d_{40} - d_{30} \geq 0,03$	-	$\geq 0,030$	$\geq 0,030$
h_0	при $\theta = 0^{\circ}$	$h_0 \geq 0,50$	$h_0 \geq 0,35$

Для удобства дальнейшей графической оценки примем ДСО в виде синусоид своей формой соответствующей табличным данным (см. рис. 1).

В качестве обобщающего параметра предлагается принять нормированную площадь ДСО, характеризующую работу нормированного восстанавливающего момента судна определяемая в пределах от 0° до 60° . Главным условием при этом будет обеспечение всех требований ИМО и Правил Регистра Украины по остойчивости.

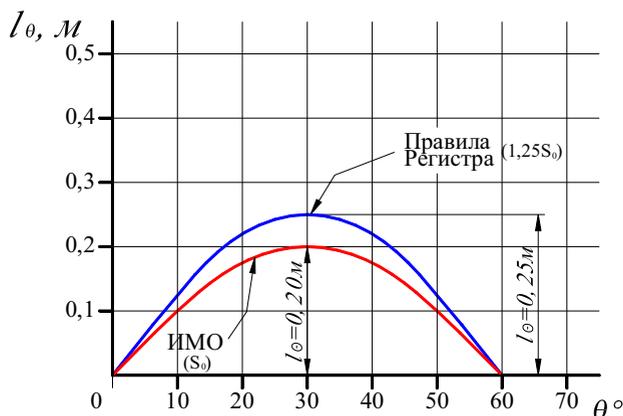


Рис. 1. Сравнительное графическое изображение диаграммы статической остойчивости по Правилам Регистра и ИМО

В качестве обобщающего параметра предлагается принять нормированную площадь ДСО, характеризующую работу нормированного восстанавливающего момента судна определяемая в пределах от 0° до 60° . Главным условием при этом будет обеспечение всех требований ИМО и Правил Регистра Украины по остойчивости.

За начальную величину примем площадь ДСО согласно ИМО – S_0 . Для сравнения ДСО будем использовать отношение площадей ДСО по ИМО и ДСО судна. Соответственно площадь ДСО по Правилам Регистра будет – $1.25S_0$. Условная графическая шкала ДСО в этом случае представляет серию кривых на рис. 1 (тонкие линии). Примем за шаг шкалы диаграмм разницу между ДСО по Правилам Регистра Украины и требованиями ИМО, то есть 0.05 м.

В соответствии с этим разбиением величину условной вероятности можно распределить, как показано в табл. 3.

Таблица 3

Условная вероятность в функции величины риска

Условная вероятность P	Градация риска	Величина риска	Площадь ДСО S_i
1	Малый	0,0-0,3	$1.75 \cdot S_0$
2	Средний	0,3-0,4	$1.50 \cdot S_0$
3	Высокий	0,4-0,6	$1.25 \cdot S_0$
4	Максимальный (критический)	0,6-0,8	S_0
5	Недопустимый (катастрофический)	свыше 0,8	менее S_0

В ней вероятность наступления рисковогo события или нежелательного исхода принята в долях от 1. Первые три показателя в шкале соответствуют "нормальному» или «разумному» риску, при котором рекомендуется принимать инвестиционные решения, связанные с гарантированным уровнем безопасности. Вторая зона имеет более высокий риск для лиц, имеющих склонность к принятию подобных решений, при условии ненаступления нежелательного исхода или банкротства в нашем случае полная гибель судна. Оптимальным считается значение 0,3, а критическим значением 0,7 и выше [3, 4].

Обращаясь к характеристикам существующих проектов малых морских судов, которые строились большими сериями и хорошо зарекомендовали себя при эксплуатации, проанализируем характеристики их остойчивости и соответствие условной вероятности наступления рисковогo события. В качестве примера показаны характеристики 2-х типов судов – промысловых и малых пассажирских. Данные по главным размерениям приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Характеристики существующих малых промысловых судов

№ п/п	Наименование	Район плавания	Δ , т.	L , м	B , м	S , м рад	$n = \frac{S}{S_0}$
1	ИМО	-	-	-	-	0,130	1,00
2	Регистр Украины	-	-	-	-	0,162	1,25
3	МРС-80	20 миль	49,7	16,5	4,80	0,202	1,55
4	МРТ (Швеция)	100 миль	93,0	18,3	5,98	0,390	3,00
5	СЧС	100 миль	115,0	22,0	5,60	0,246	1,89
6	Сейнер РС-300	Неогран.	234	30,0	6,6	0,236	1,82
7	РТ (Канада)	Неогран.	819	39,6	10,60	0,535	4,12

Малый сейнер МРС-80 показал в процессе эксплуатации хорошие мореходные качества, в том числе высокую надёжность с точки зрения остойчивости. Если рассмотреть характер его ДСО то мы видим, что запас или значение $n = 1,55$ больше минимальных требований, то есть имеет дополнительный запас остойчивости что соответствует практически минимальной вероятности опрокидывания. В сравнении с например с большим судном МПС "Александр Грин", который имеет характер ДСО $n = 1,15$ хуже несмотря на большие размеры и почти в двое большее водоизмещение и соответственно величину вероятности равную "высокому уровню" вероятности P_i . Аналогично можно охарактеризовать и другие промысловые и пассажирские суда.

Таблиця 5

Характеристики суцтєвуючих малых пассажирских судов

№ п/п	Наименование	Район плавания	Δ , т.	L , м	B , м	S , м рад.	$n = \frac{S}{S_0}$
1	ИМО	-	-	-	-	0,130	1,00
2	Регистр Украины	-	-	-	-	0,162	1,25
3	"Александр Грин"	20 миль	95,0	30,0	5,10	0,149	1,17
4	"Аркадия"	15 миль	54,2	21,0	4,40	0,147	1,13
5	"Алмаз"	20 миль	105,0	24,0	5,20	0,178	1,37
6	"Радуга", серия I	20 миль	55,0	21,0	4,4	0,164	1,26
7	"Радуга", серия II	20 миль	52,6	23,3	4,4	0,166	1,27

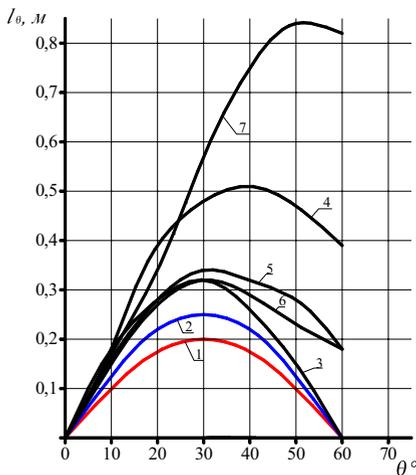


Рис. 2. Диаграммы статической остойчивости малых промысловых судов:

1 – ИМО (S_0); 2 – ПР ($1,25S_0$);
3 – МРС-80 ($1,55S_0$); 4 – МРТ ($3,0S_0$);
5 – СЧС ($1,89S_0$); 6 – Сейнер РС-300 ($1,27S_0$); 7 – РТ ($4,12S_0$)

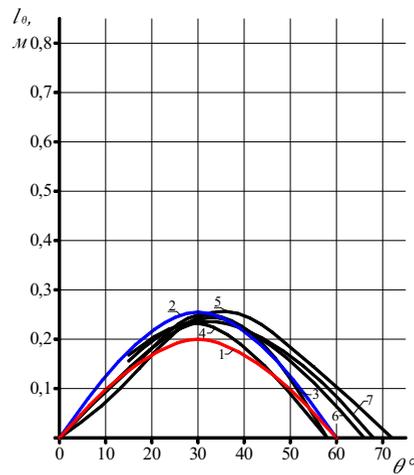


Рис. 3. Диаграммы статической остойчивости малых пассажирских судов:

1 – ИМО (S_0); 2 – ПР ($1,25S_0$);
3 – "Александр Грин" ($1,17S_0$);
4 – "Аркадия" ($1,13S_0$); 5 – "Алмаз" ($1,37S_0$); 6 – "Радуга", серия I ($1,26S_0$);
7 – "Радуга", серия II ($1,27S_0$)

Например МРТ (Швеция) имеет излишнюю остойчивость и значение $n = 3,00$ за счет учета сильно развитого бака, юта и учета надстройки при расчете остойчивости. Интересен и проект сейнера СО со значением $n = 1,59$ спроектированный для океанского экспедиционного промысла. Первая попытка использования этого судна на промысле показала очень тяжелые условия обитаемости и поэтому в 1954 году ему изменили район плавания до 100 миль и вместо СО стали строить РС-300 увеличенного размера. Также имеющий достаточно высокий запас по величине отношения площадей $n = 1,82$. Для сравнения в таблице приведено промысловое судно большего размера РТ (Канада) с значением $n = 4,12$. ДСО значительно превышает все приведенные ранее.

Все приведенные МПС в сравнении с рыболовными судами имеют малые запасы по значениям площадей ДСО. Однако не следует считать, что МПС при этом небыли надёжными судами. Случаев аварий с затоплением судов этого класса из за потери остойчивости, не было зарегистрировано на Черноморском побережье. Однако в сравнении с ДСО рыболовов видна явная разность в обеспечении безопасности. Это связано в первую очередь с назначением района плавания. Все типы МПС имеют ограничение по углублению в открытое море – 1, 2, 3 и 10 миль (Алмаз). Это обеспечивает возможность МПС укрыться во время налетевшего внезапно шторма в ближайшем порту или добраться в места-убежища, так как скорость хода у этих судов составляет 10-14 узлов. И напротив у рыболовов, которые осуществляют лов на удалении до 20 и 100 миль от берега, а их скорость составляет 8-10 узлов и следовательно вероятность попадания в шторм гораздо выше, поэтому ДСО у них и была со значительным запасом.

Исходя из этого, при назначении района плавания судна желательно учитывать условия и вероятность попадания малого судна в штормовые условия. Поэтому предложение увязать площадь ДСО или относительную работу восстанавливающего момента, с районами плавания достаточно актуально.

На сегодняшний день нет четкого нормирования ДСО по районам плавания. В правилах только указано, какие особенности должны учитываться при назначении района плавания. Нет четких норм и рекомендаций определения минимальных ДСО для различных районов. Поэтому приведенная условная шкала относительных площадей ДСО и соответствующих ей районов плавания приведены в табл. 6.

Вывод. Предлагаемая методика оценки риска и надёжности проектируемого малого судна позволяет на начальных стадиях определиться, какой уровень безопасности будет заложен при создании судна, а следовательно, с какой степенью риска оно будет эксплуатироваться. Это в свою очередь позволит заказчику определять более точно стоимость судна в целом.

Таблиця 6

*Нормирование характеристик районов плавания
по величине площади ДСО малых морских судов*

Название района плавания	Удаление от берега, мили	Удаление от места-убежища, мили	Высота волны, м.	Сила ветра, баллы	Площадь ДСО S_i
Ограниченный район плавания (R2)	100	100	$h_{3\%} = 7,0$	7	$1,75S_0$
1-й прибрежный – океанический и морской прибрежный район	20	50	$h_{3\%} = 6,0$	7	$1,5S_0$
2-й прибрежный: - зона 1 внутренних водных путей, - прибрежная зона открытых и внутренних морей.	без ограничений 5	без ограничений 20	$h_{3\%} = 2,0$	6	$1,25S_0$
3-й прибрежный: - зона 2 внутренних водных путей, - прибрежная зона внутренних морей и зона 1 внутренних водных путей.	без ограничений 1,0	без ограничений 5,0	$h_{3\%} = 1,2$	6	S_0

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Александров М.Н. *Безопасность человека на море* / М.Н. Александров. – Л.: Судостроение, 1983. – 208 с.
2. *Marine Accident Investigation Branch First Floor Carlton House Carlton Place Southampton United Kingdom SO15 2DZ, July 2002, Extract from The Merchant Shipping (Accident Reporting and Investigation) , Regulations 1999, Marine Assident Investigation Branch (MAIB) – Safety Digest. – Fishing. – 2002. – 77 с.*
3. Лапуста М.Г. *Риски в предпринимательской деятельности* / М.Г. Лапуста, Л.Г. Шаршукова. – М.: ИНФРА-М, 1998. – 177 с.

4. Максимов В.И. Моделирование риска и рискованных ситуаций: Учебное пособие / В.И. Максимов, О.И. Никонов; под ред. Н.Н. Астафьева. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 82 с.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 629.437

Ю.М. Ткаченко, Б.М. Мартинець, М.О. Цибенко

ДО ПРОБЛЕМИ ЖОРСТКОСТІ ФОРМИ
М'ЯКОЇ ПОВІТРЯОПОРНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ

Предлагается метод оценки жесткости формы пневматической абсолютно мягкой цилиндрической оболочки. Для оценки жесткости формы мягкой оболочки принято произведение характеристики формы поперечного сечения на давление в оболочке. Излагается метод тарировки жесткости формы мягкой цилиндрической оболочки. Анализируются представленные результаты.

Ключевые слова: *мягкая пневматическая оболочка, жесткость формы мягкой оболочки, тарировка, избыточное давление.*

Пропонується метод оцінки жорсткості форми пневматичної абсолютно м'якої циліндрової оболонки. Для оцінки жорсткості форми м'якої оболонки прийнятий твір характеристики форми поперечного перетину на тиск в оболонці. Викладається метод таріровки жорсткості форми м'якої циліндрової оболонки. Аналізуються представлені результати.

Ключові слова: *м'яка пневматична оболонка, жорсткість форми м'якої оболонки, таріровка, надлишковий тиск.*

The method of estimation of inflexibility of form of pneumatic absolutely soft cylindrical shell is offered. For the estimation of inflexibility of form of soft shell work of description of form of cross-sectional is accepted on pressure in a shell. The method of calibration of inflexibility of form of soft cylindrical shell is expounded. The presented results are analyzed.

Keywords: *soft pneumatic shell, inflexibility of form of soft shell, calibration, surplus pressure.*

Актуальність проблеми. Все більшого поширення як у будівництві (куполи спортивних споруд та ринків, сховища різноманітного призначення, надувна опалубка і т.п.) [1], так і в суднобудуванні (надувні човни та рятувальні плоти, гнучка огорожа повітряної подушки, гнучкі зернові перепони – шифтінгбордси) [2,3] набувають надувні конструкції з м'яких матеріалів.

Головним елементом сучасних м'яких надувних конструкцій є м'які оболонки, здебільшого циліндричної форми. Податливість м'яких оболонок до формозміни принципово відрізняє їх роботу й методи розрахунку від того що добре вивчено в будівельній механіці. Якщо для жорсткої конструкції рівноважна форма, навіть критична, відома, то форма м'якої

циліндричної оболонки до втрати стійкості форми оболонки набуває безліч рівноважних форм. Для жорсткої конструкції критична форма нічим не відрізняється від оптимальної, а для м'якої конструкції це не властиво.

В процесі проектування пневматичних споруд з м'яких матеріалів будь-якого призначення необхідно передбачувати можливість зміни форми при дії зовнішнього навантаження. Здатність м'якої оболонки до формозміни характеризується жорсткістю заданої форми оболонки. Жорсткість м'якої оболонки принципово відрізняє її роботу і методи розрахунку від того що добре вивчено в будівельній механіці.

Постанова проблеми та її дослідження. Жорсткість конструкції із традиційних будівельних матеріалів визначається як добуток модуля пружності на геометричну характеристику поперечного перерізу конструкції. Оскільки модуль пружності для абсолютно м'якого матеріалу дорівнює нулю, тому традиційне визначення жорсткості для конструкцій з м'якого матеріалу неприйнятне.

Задача дослідження жорсткості форми м'якої оболонки розглядається в роботах [2-5]. Опубліковані результати свідчать, що жорсткість форми оболонки залежить від внутрішнього тиску та відстані між лініями кріплення країв оболонки. Основним недоліком вказаних досліджень – відсутність кількісної оцінки жорсткості форми м'якої оболонки.

Мета дослідження. Метою дослідження є виявлення залежності жорсткості форми циліндричної пневматичної оболонки від конструктивних особливостей та зовнішнього навантаження м'якої циліндричної оболонки.

Виклад основного матеріалу. Розглядається циліндрична оболонка з абсолютно м'якого, невагомого і нерозтяжного матеріалу. Оболонка своїми краями закріплена на жорстких паралельних твірних A і C , відстань між якими B .

Циліндрична форма оболонки забезпечується внутрішнім надлишковим тиском P . Матеріал оболонки вважаємо абсолютно гнучким, нерозтяжним та невагомим.

Задача визначення параметрів форми рівноважного стану оболонки зводиться до вирішення трансцендентного рівняння відносно центрального кута 2α .

$$B - \frac{\sin \alpha}{\alpha} = 0.$$

Радіус дуги визначається з співвідношення $R = L/2\alpha$. Координати точки N де дотична до оболонки паралельна основі визначаються за формулами

$$Y_n = H_n = R(1 - \cos \alpha); X_n = B_n = R \sin \alpha.$$

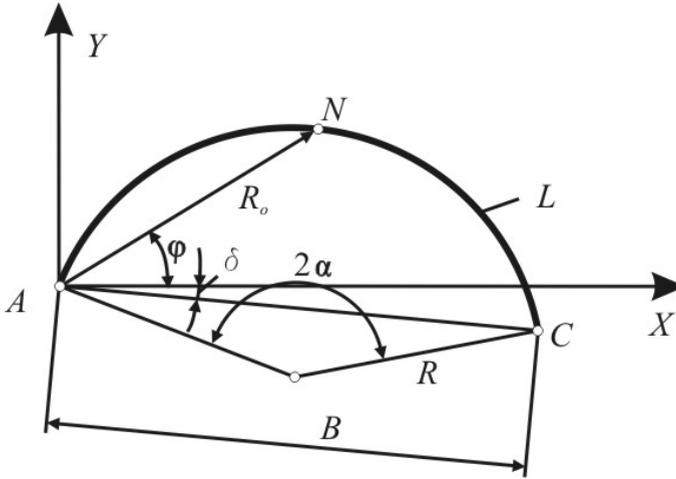


Рис.1. Поперечний переріз оболонки та прийняті позначення

$$\text{Радіус-вектор точки } N - R_0 = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2} = \sqrt{H_n^2 + B_n^2}.$$

На відміну від звичних конструкцій, вводимо поняття «жорсткість форми» м'якої оболонки, під яким будемо розуміти здатність оболонки чинити опір зміні форми і визначати за формулою

$$G = R_0 P,$$

де R_0 – радіус вектор точки оболонки в якій дотична до оболонки – паралельна основі AC , приймаємо його за характеристику форми поперечного перерізу оболонки; P – надлишковий тиск в оболонці. Таким чином розмірність жорсткості форми G [Па = Н/м].

Для узагальнення результатів розрахунку та зменшення числа характеристик впливу на жорсткість форми, перейдемо до безвимірних параметрів. При переході до безвимірних параметрів всі лінійні характеристики розділимо на периметр перерізу оболонки L , силові на PL . Перехід до безвимірних параметрів здійснюємо за формулами, позначаючи безвимірні параметри прописними літерами

$$r = \frac{R}{L}; b = \frac{B}{L}; h_n = \frac{H_n}{L}; b_n = \frac{B_n}{L};$$

$$\rho_0 = \frac{R_0}{L} = \sqrt{h_n^2 + b_n^2}; t = \frac{T}{PL}$$

У безвимірних параметрах розрахунковий алгоритм прийме вигляд

$$b = \frac{\sin \alpha}{\alpha}; r = 1/2\alpha; t = r; y_n = h_n = r(1 - \cos \alpha); x_n = b_n = r \sin \alpha;$$

$$\rho_0 = \sqrt{x_n^2 + y_n^2} = \sqrt{h_n^2 + b_n^2}; g = \rho.$$

Таким чином жорсткість форми циліндричної оболонки в безвимірному вигляді $g = \rho$, тобто величина жорсткості оболонки є не що інше як характеристика поперечного перерізу, а вертикальна і горизонтальна жорсткість оболонки відповідно $g_s = h_n$, $g_z = b_n$. Для підтвердження правомірності використання запропонованої оцінки жорсткості $g = \rho$ – геометричної характеристики форми поперечного перерізу м'якої оболонки, розглянемо часткові випадки форми оболонки.

1. $b = 0$; $g_z = b_n = 0$ – форма оболонки – замкнутий циліндр, що закріплений вздовж жорсткої твірної. Жорсткість оболонки $g_s = h_n = 2r$. Форма оболонки має максимальну вертикальну жорсткість і нульову горизонтальну жорсткість, тобто при дії горизонтально направленої сили оболонка легко відхиляється від рівноважного стану майже без деформації.

2. $g_s = h_n = r$; $g_z = b_n = r$ і $g = \rho = r\sqrt{2}$ – вертикальна і горизонтальна жорсткість форми м'якої оболонки і здатність до формозміни однакові.

Далі розглянемо ту ж оболонку на яку діє зовнішнє навантаження тиском, рівнодіюча якого направлена паралельно основі кріплення. Розрахункова схема оболонки та прийняті позначення представлені на рис.2.

При обтисканні оболонки зовнішнім навантаженням об'єм оболонки зменшується і згідно закону Бойля-Маріотта внутрішній тиск збільшується, а точка N переходить в точку N_1 .

Для розв'язку поставленої задачі необхідно задати стрілку сегмента обтискування f . Стрілку сегмента обтискування будемо задавати в долях висоти оболонки h_n . Далі поступаємо наступним чином: визначаємо довжину хорди зі стрілкою f за формулою

$$a_f = 2\sqrt{2fr - f^2};$$

визначаємо центральний кут сегменту хорди a_f

$$\psi = 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{2fr - f^2}}{r} \right);$$

об'єм цього сегменту буде

$$v = r^2 [2\psi - \sin 2\psi] / 2;$$

об'єм оболонки до обтискання

$$V_0 = 2\pi r^2 \alpha - br \cos \alpha;$$

фактичний об'єм оболонки після обтискання

$$V = V_0 - v = 2\pi r^2 \alpha - br \cos \alpha - r^2 [2\psi - \sin 2\psi] / 2;$$

тиск повітря в обтиснутій оболонці стане

$$p_1 = V_0 / V;$$

радіус-вектор точки N_1 визначається з розгляду трикутника ANN_1

$$NN_1 = b_1 = \sqrt{f^2 + \left(\frac{a_f}{2}\right)^2} \quad \text{і} \quad \rho_{o1} = \sqrt{\rho_o^2 + b_1^2 + 2\rho_o b_1 \cos(\varphi + \delta + \psi/2)};$$

жорсткість заданої форми оболонки буде $g = p_1 \rho_1$.

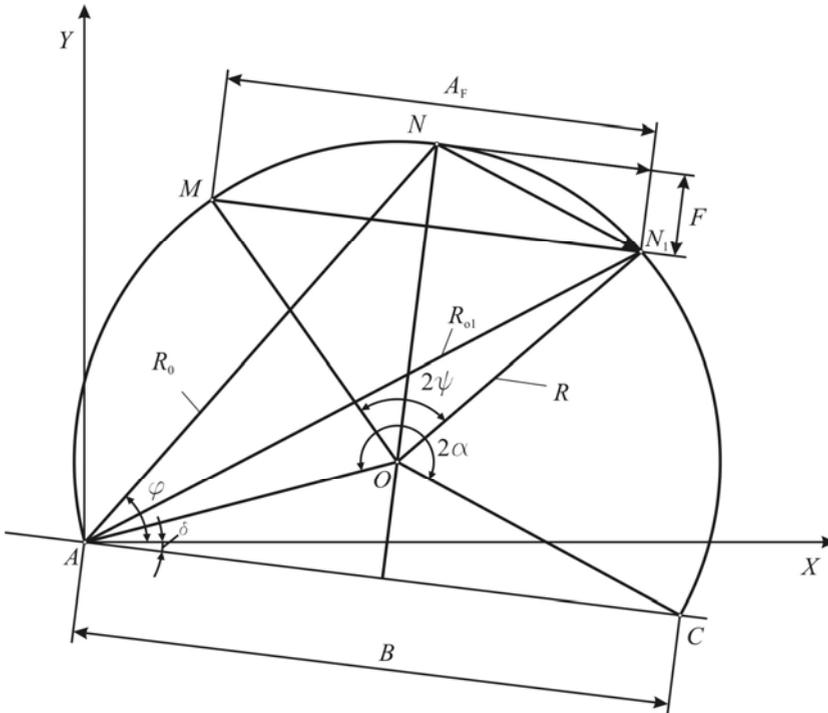


Рис.2. Розрахункова схема оболонки та прийняті позначення

Тут прийнято:

φ – кут нахилу радіус-вектора до горизонту;

2ψ – центральний кут дуги MNN_1 ;

2α – центральний кут форми оболонки.

Результати розрахунку жорсткості при обтисканні м'якої оболонки представлені в таблиці і на рис.3.

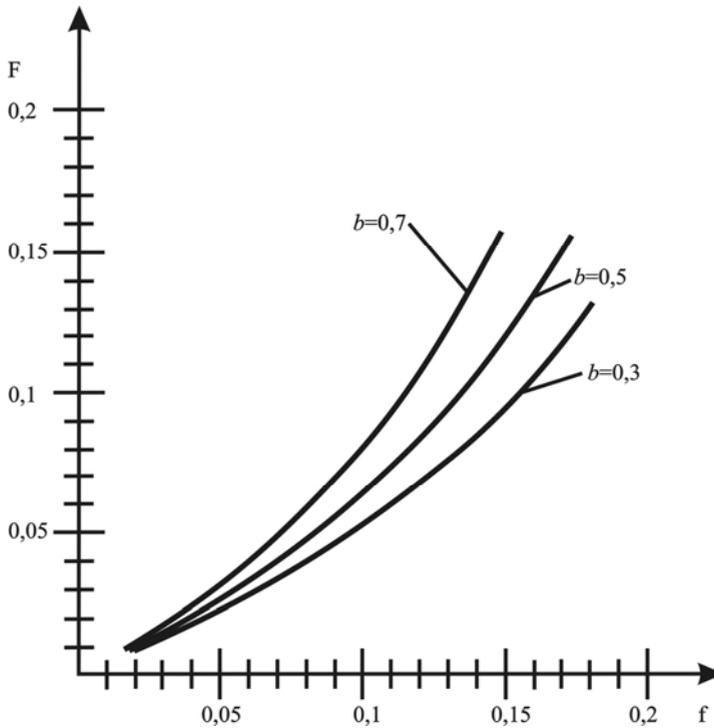


Рис.3. Залежність між силою обтискання і величиною деформації оболонки для різних значень відстані між лініями кріплення

Висновки

1. Як свідчать отримані результати жорсткість форми м'якої оболонки зростає при збільшенні відстані між лініями кріплення оболонки b . Але слід відзначити, що g зростає за рахунок зростання горизонтальної жорсткості g_2 .

2. Жорсткість форми зростає при обтисканні як за рахунок зростання внутрішнього тиску, так і за рахунок збільшення характеристики форми ρ_{o1} . Характер залежності характеристики форми оболонки ρ_{o1} від величини ступеня обтискування f має чітко виражений максимум, що свідчить про зменшення вертикальної жорсткості g_3 і зростання горизонтальної g_2 .

3. Жорсткість як і форма оболонки не залежать від величини нахилу (кут δ) основи кріплення оболонки до горизонту.

Таблиця
Результати розрахунку жорсткості при обтисканні м'якої оболонки

$b = 0,3; 2\alpha = 2,35644; r = 0,212184; h_{n0} = 0,36225; b_{n0} = 0,15; V_0 = 0,12860; \varphi = 1,178; \rho_0 = 0,3921$

k	$f = kh_{n0}$	αf	2ψ	V_1	$V = V_0 - V_1$	ρ_{e1}	P_1	$g = \rho_{e1}P_1$	$F = gf$
0.0025	0.00090	0.03916	0.09242	0.00002	0.12858	0.39916	1.00018	0.39924	0.00036
0.005	0.00181	0.05533	0.13076	0.00007	0.12854	0.40185	1.00052	0.40206	0.00072
0.010	0.00362	0.07808	0.18504	0.00019	0.12841	0.40540	1.00147	0.40601	0.00147
0.015	0.00543	0.09542	0.22680	0.00035	0.12826	0.40793	1.0027	0.40900	0.00222
0.020	0.00724	0.10994	0.26207	0.00053	0.12807	0.40993	1.00416	0.41164	0.00298
0.025	0.00905	0.12265	0.29322	0.00074	0.12786	0.41159	1.00581	0.41399	0.003749
0.050	0.01811	0.17156	0.41618	0.00209	0.12651	0.41716	1.01652	0.42405	0.00768
0.075	0.02716	0.20776	0.51161	0.00381	0.12479	0.42046	1.03056	0.43325	0.01177
0.100	0.03622	0.23715	0.59299	0.00583	0.12277	0.42241	1.04751	0.44248	0.01602
0.125	0.04528	0.26203	0.66552	0.00809	0.12050	0.42360	1.06718	0.45207	0.020479
0.150	0.05433	0.28359	0.73189	0.01056	0.11803	0.42421	1.08954	0.46220	0.02511
0.175	0.06339	0.30254	0.79368	0.01322	0.11537	0.42436	1.11462	0.47300	0.02998
0.200	0.07245	0.31935	0.85191	0.01604	0.11256	0.42413	1.14252	0.48458	0.03510
0.225	0.08150	0.33434	0.90731	0.01900	0.10959	0.42357	1.17339	0.49702	0.040511
0.250	0.09056	0.34774	0.96041	0.02209	0.10651	0.42274	1.20743	0.51043	0.04622
0.275	0.09962	0.35973	1.01160	0.02529	0.10330	0.42165	1.24489	0.52491	0.05229
0.300	0.10867	0.37045	1.06121	0.02860	0.09999	0.42033	1.28606	0.54057	0.05874
0.325	0.11773	0.38000	1.10947	0.03200	0.09659	0.41880	1.33132	0.55755	0.06564
0.350	0.12679	0.38848	1.15660	0.03548	0.09311	0.41707	1.38108	0.57601	0.07303
0.400	0.14490	0.40246	1.24813	0.04265	0.08594	0.41304	1.49628	0.61803	0.08955
0.450	0.16301	0.41281	1.33694	0.05004	0.07855	0.40831	1.6370	0.66842	0.10896
0.500	0.18112	0.41979	1.42390	0.05758	0.07101	0.40290	1.81095	0.72964	0.13216

4. Запропонована методика та отримані результати дозволяють розв'язувати обернену задачу, тобто при заданій величині навантаження обтискання визначати величину деформації форми оболонки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Отто Ф., Тростель Р. Пневматические строительные конструкции.* – М.: Стройиздат, 1967. – 320 с.
2. *Магула В.Э. Судовые эластичные конструкции.* – Л.: Судостроение, 1978. – 263 с.
3. *Егоров И.Т., Соколов В.Т. Проектирование быстроходных судов.* – Л.: Судостроение, 1971. – 424 с.
4. *Мартынец Б.Н. Упругие характеристики мягкой цилиндрической воздухоопорной оболочки // Судостроение: Респ. межвед. научн.-техн. сб. – Вып. 36. – 1987. – С.33-37.*
5. *Мартынец Б.Н., Зайцев В.В. Жесткость и упругость формы мягкой оболочки геометрически изгибаемого класса // Судостроение: Респ. межвед. научн.-техн. сб. – Вып. 38. – 1989. – С.50-58.*

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 629.5.017.1

А.И. Раков, А.А. Корниенко

**ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОБЪЁМОВ
ФОРМЫ КОРПУСА НА ОСТОЙЧИВОСТЬ**

Доклад представляет собой фундаментальную основу для будущих исследований. Приводится сравнение начальной метацентрической высоты и площади диаграммы статической остойчивости для различных вариантов модификации формы корпуса судна.

Ключевые слова: *остойчивость, сейнер, метацентрическая высота, диаграмма статической остойчивости.*

Доповідь являє собою фундаментальну основу для майбутніх досліджень. Проводиться порівняння статичної остійності для різних варіантів модифікації форми корпусу судна.

Ключові слова: *остійність, сейнер, метацентрична висота, діаграма статичної остійності.*

The report is the basis for future investigations. Metacentric heights areas of GZ-diagram are compared for different modifications of the vessel's hull.

Key words: *stability, seiner, metacentric height, righting arms diagram.*

Актуальность. «...Самое главное все равно в том, как именно гибнет или будет гибнуть судно. Переворачивание – счет идет на секунды – это хаос, травмы, переломы и ушибы, это мгновенная потеря ориентации в мире, перевернутом с ног на голову...» [1].

Целью работы является анализ влияния на начальную метацентрическую высоту и площадь диаграммы статической остойчивости различных вариантов модификации формы корпуса судна.

Изложение основного материала. Нормирование остойчивости [2] в мировой практике классификационных обществ и ИМО сводится к двум направлениям: нормирование остойчивости в неповрежденном состоянии и аварийная остойчивость. Стоит отметить, что к остойчивости в поврежденном состоянии требования ниже, не смотря на то, что повреждения зачастую возникают в условиях сильного шторма. Это обусловлено исключительно экономикой. Слишком дорогим окажется судно, удовлетворяющее критериям безопасности неповрежденного судна при получении повреждения. Так, например, согласно Правилам Российского Морского Регистра Судоходства минимальная метацентрическая высота неповрежденного судна 0,15 м, поврежденного 0,05 м [3].

Для предотвращения опрокидывания необходимо максимально увеличить площадь диаграммы статической остойчивости (диаграммы

Рида), увеличить насколько это возможно её параметры, среди которых основные: максимальное плечо статической остойчивости, протяженность диаграммы, метацентрическая высота.

Стоит напомнить об отрицательном влиянии чрезмерного увеличения указанных выше параметров.

Чрезмерная метацентрическая высота ухудшает обитаемость судна за счёт уменьшения периода качки

$$T = \frac{c \cdot B}{\sqrt{h}}, \text{ с}$$

где c – числовой коэффициент, м;

B – ширина судна, м;

h – поперечная метацентрическая высота.

Помимо ухудшения обитаемости, резкая качка – это увеличение инерционных нагрузок на борта трюмов и устройства крепления грузов. Рост ускорений можно смоделировать математически согласно Правилам Регистра ч. II п. 1.3.3 [3].

Примем, что у средства крепления груза есть SWL, превышение которого, например, в 1,5 раза (запас) приведёт к разрушению и смещению груза. Действующая сила от бортовой качки (примем амплитуду килевой и вертикальной качки равными нулю) есть

$$F = m \cdot a$$

где m – масса закрепленного груза.

$$a = \left(\frac{2\pi}{T_B} \right)^2 \cdot \theta \cdot z_0;$$

$$T_B = \frac{c \cdot B}{\sqrt{h}};$$

$$F = m \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{h} \cdot \theta}{c \cdot B} \right)^2 \cdot z_0;$$

Следовательно, при росте метацентрической высоты от 0,70 м до 1,1 м значение расчётной силы F возрастёт более чем в 1,5 раза и произойдёт разрушение средства крепления груза.

Исходя из сказанного выше, диаграмма Рида приближается к идеальной, имея пологий характер на малых углах крена (до 10 градусов) и с повышением крутизны после 10 градусов.

С другой стороны, повышенная метацентрическая высота позволяет сохранять небольшую амплитуду качки, и таким образом средства крепления грузов испытывают меньшую нагрузку, которая стала критической в случае с аварией парома SUNNY DAY на Черном море 14 сентября 2007 года.

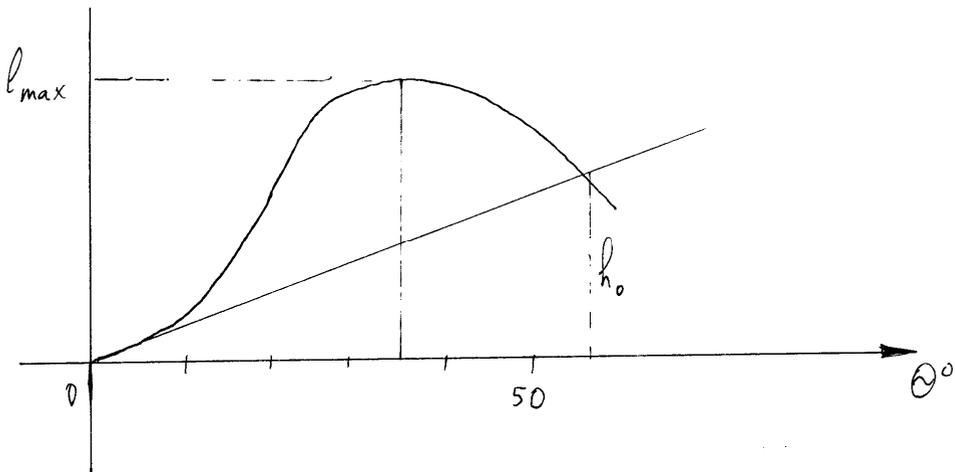


Рис. 1. Тип II ДСО по Семенову-Тянь-Шанскому

Приведенная на рис. 1 ДСО относится по Семенову-Тянь-Шанскому к типу II. Он «...характерен для кораблей с малой начальной метацентрической высотой (обычно около 0,5 м или даже менее) и большим надводным бортом. Кривая отходит от касательной вверх, затем имеет точку перегиба. Получается т.н. S-образная кривая статической остойчивости. Не смотря на малую метацентрическую высоту, остойчивость на больших углах крена оказывается обеспеченной благодаря размерам площади и протяженности диаграммы статической остойчивости...» [4].

На рис. 2 представлены результаты исследования, выполненного при помощи свободно распространяемой кораблестроительной учебной САПР (правообладатель <http://da-usg.net.ua/>), позволяющей рассчитывать плавучесть, остойчивость и непотопляемость.

Исследовалась форма корпуса среднего черноморского сейнера длиной $L = 25$ м, шириной $B = 5,6$ м, высотой борта на миделе $D = 3$ м, с седловатостью и погибью бимсов. Было рассмотрено 16 модификаций «голового корпуса»:

- 0 – «голый корпус»;
- 1 – бак протяженностью и высотой 1,8 м;
- 2 – длинный бак протяженностью и высотой 1,8 м;
- 3 – ют протяженностью и высотой 1,8 м;
- 4 – длинный ют протяженностью и высотой 1,8 м;
- 5 – бак и ют, протяженностью каждый и высотой 1,8 м;
- 6 – средняя надстройка протяженностью и высотой 1,8 м;
- 7 – сплошная надстройка высотой 1,8 м.

Рубки:

- 8 – средняя рубка шириной, протяженностью и высотой 1,8 м;
- 9 – носовая рубка шириной, протяженностью и высотой 1,8 м;
- 10 – кормовая рубка шириной, протяженностью и высотой 1,8 м;
- 11 – средние поплавки протяженностью и сечением 1×1 м;

- 12 – носовые поплавки протяженностью и сечением 1x1 м;
- 13 – кормовые поплавки протяженностью и сечением 1x1 м;
- 14 – носовые и кормовые поплавки протяженностью и сечением 1x1 м;
- 15 – сплошные поплавки сечением 1x1 м;
- 16 – сплошные поплавки сечением 0,5x0,5 м;

Для всех 17 вариантов были приняты постоянное значение водоизмещения 120 т, абсцисса центра тяжести $X_g = 12$ м (от кормового перпендикуляра), аппликаты центра тяжести $Z_g = 2,58$ м.

В таблице представлены некоторые параметры диаграмм статической остойчивости – метацентрическая высота и площадь диаграммы.

Метацентрическая высота является наиболее простой характеристикой остойчивости [4].

Площадь диаграммы статической остойчивости характеризует работу, затраченную на наклонение судна

$$T = \Delta \int_0^{\theta} l_{\theta} d\theta .$$

Угол заливания – это угол крена, при котором в воду входят отверстия, могущие быть открытыми. Отверстия, считающиеся открытым, – отверстия в верхней палубе или бортах корпуса, а также в палубах, бортах и переборках надстроек и рубок, закрытия которых в отношении непроницаемости, прочности и надежности не отвечают требованиям разд.7 части III «Устройства оборудование и снабжение» правил Регистра [3].

Малые отверстия, такие как забортные отверстия судовых систем и трубопроводов, фактически не влияющие на остойчивость при динамическом крене судна, не считаются открытыми. Отверстия вентиляции машинных помещений, отверстия вентиляции пассажирских помещений и другие отверстия, которые должны быть открыты для поступления воздуха внутрь судна при плавании в штормовых условиях, должны рассматриваться как открытые отверстия даже если они оборудованы непроницаемыми при воздействии моря закрытиями. Углом заливания ограничивается площадь рабочей части диаграммы Рида при определении критерия погоды. Двери нижнего яруса надстройки или рубки считаются открытыми, если нет выхода из помещения на верхний ярус.

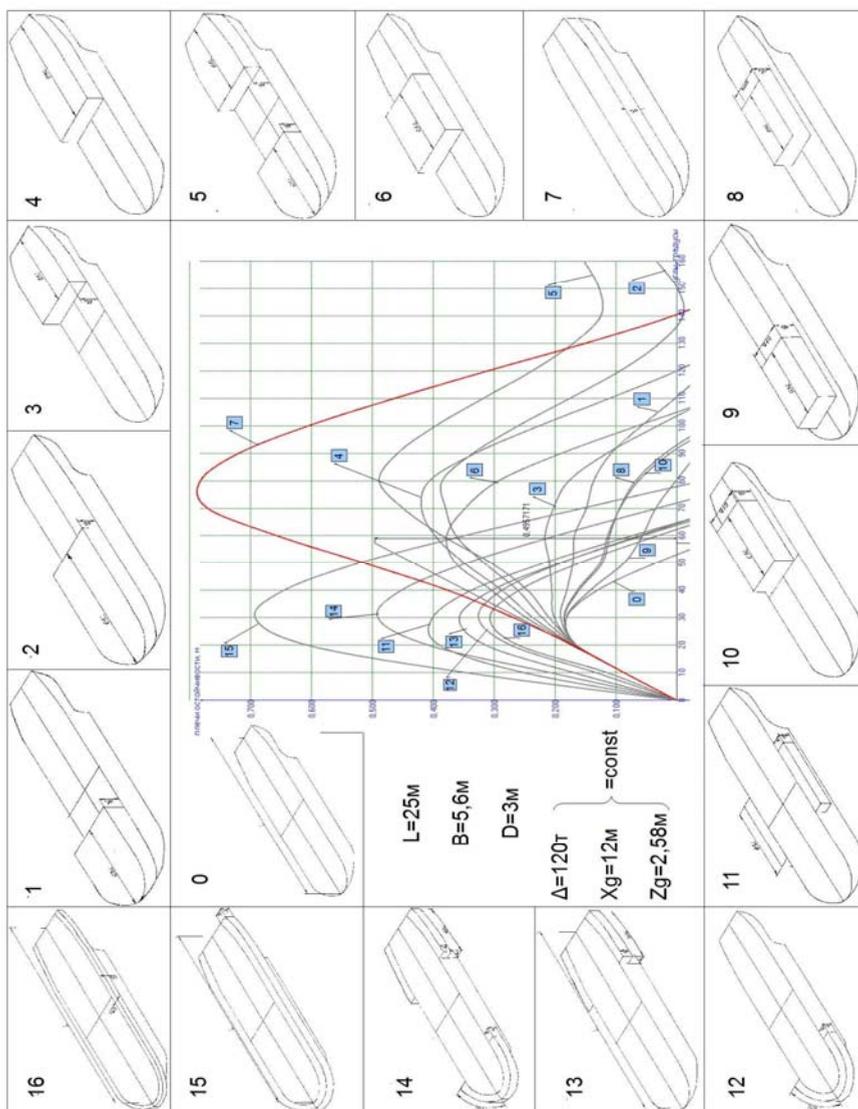


Рис. 2 - Влияние дополнительных объёмов формы корпуса на остойчивость

Малые отверстия, такие как забортные отверстия судовых систем и трубопроводов, фактически не влияющие на остойчивость при динамическом крене судна, не считаются открытыми. Отверстия вентиляции машинных помещений, отверстия вентиляции пассажирских помещений и другие отверстия, которые должны быть открыты для поступления воздуха внутрь судна при плавании в штормовых условиях, должны рассматриваться как открытые отверстия даже если они оборудованы непроницаемыми при воздействии моря закрытиями. Углом заливания ограничивается площадь рабочей части диаграммы Рида при определении критерия погоды. Двери нижнего яруса надстройки или рубки считаются открытыми, если нет выхода из помещения на верхний ярус.

Таблица

Метацентрическая высота и площадь ДСО

Номер	h,	Площадь, м*рад	Площадь до угла 40 град., м*рад	По сравнению с № 0	
				h_i / h_0	площадь i/ площадь 0
0.	0,514	0,102	0,087	-	-
1.	0,511	0,250	0,093	0,99	2,45
2.	0,510	0,535	0,105	0,99	5,25
3.	0,516	0,279	0,097	1,00	2,74
4.	0,516	0,527	0,111	1,00	5,17
5.	0,513	0,772	0,102	1,00	7,57
6.	0,515	0,423	0,115	1,00	4,15
7.	0,516	1,026	0,124	1,00	10,06
8.	0,516	0,175	0,090	1,00	1,72
9.	0,518	0,131	0,088	1,01	1,28
10.	0,509	0,176	0,090	0,99	1,73
11.	2,185	0,288	0,211	4,25	2,82
12.	0,727	0,219	0,153	1,41	2,15
13.	1,096	0,240	0,173	2,13	2,35
14.	1,318	0,370	0,233	2,56	3,63
15.	2,989	0,576	0,344	5,82	5,65
16.	0,520	0,195	0,142	1,01	1,91

Очевидно, что группа «надстройки» (№ 1-7) и группа «рубки» (№ 8-10) оставляют неизменной метацентрическую высоту, поскольку дополнительные объёмы не входят в воду при малых наклонениях. Группа «поплавки» (№ 11-16) показывает характер изменения метацентрической высоты в зависимости от объёмов, погружаемых в воду даже при малых наклонениях.

Для судов представленного типа, Л.М. Ногид рекомендует допустимый минимум метацентрической высоты 0,6 м. А.И. Раков рекомендует допустимый максимум метацентрической высоты 1,0 м. Таким образом, рекомендуемая метацентрическая высота составляет 0,6-1,0 м.

Из таблицы 1 видно, что лишь вариант 12 с начальной метацентрической высотой $h = 0,727$ м лежит в пределах рекомендуемого диапазона. Все прочие варианты модификаций не попадают даже в допустимый диапазон 0,6-1,0 м. Так группа «надстройки» (№ 1-7) и группа «рубки» (№ 8-10) имеет слишком маленькую метацентрическую высоту $h = 0,5$ м, недостаточную для судов такого типа. Поплавки с сечением 1x1, имея длину (минимальная из рассматриваемых в данной работе) в вариантах 11 (миделевое расположение) и 13 (кормовое расположение), дают чрезмерно завышенную метацентрическую высоту $h = 2,158$ м. Вариант 12 (носовое расположение поплавок) попадает в рекомендуемый диапазон метацентрических высот, имея поплавки того же размера что и варианты 11 и 13, лишь благодаря тому, что ватерлинии в носу имеют сужение, обеспечивающее расположение поплавок ближе к ДП. Вариант 16 с сечением поплавок 0,5x0,5 м имеет потенциальную возможность войти попасть в рекомендуемый интервал метацентрических высот, при условии изменением их длины, с обязательным погружением на тихой воде. Предположительно ватерлиния должна лежать на середине высоты поплавок.

Если сравнить вариант 15 и 16, становится видно, что при увеличении объема поплавок в 4 раза (от сечения 0,5x0,5 м к сечению 1x1 м) плечо максимума возрастает в 2,23 раза, а угол заката в 1,26.

Даже вариант 11 с поплавками длиной 0,3L и сечением 1x1 м превосходит вариант 16 со сплошными поплавками сечением 0,5x0,5 в 1,32 раза по максимальному и плечу и в 1,03 раза по протяженности.

Угол заливания на таких судах находится, как правило, в районе 30-40 ° – это соответствует входу в воду комингс входа в рубку. Согласно Правилам [3] ч.IV п.2.2.1 площадь диаграммы статической остойчивости должна быть не менее 0,09 м·рад до угла крена 40 °. Иначе говоря, энергия, которую затратят внешние силы на наклонение судна до угла заливания, должна быть не менее 0,09 D кДж, где D – водоизмещение судна, кН. Надстройки (модификации 1-7) увеличивают такую энергию в среднем в 1,23 раза. Рубки (8-10) дают худший результат – 1,03. Поплавки повышают эту энергию в среднем в 2,41 раза.

Такие значения соответствуют фиксированной координате открытого отверстия.

Выводы:

- допустимый предел метацентрических высот для судов рассмотренного типа составляет 0,6-1,0 м, рекомендованный – 0,7-0,8 м;
- контроль метацентрической высоты можно осуществлять с помощью бортовых поплавок, наполовину погруженных в воду на тихой воде;
- для судна выбранных размерений необходимо подробнее рассмотреть варианты с сечением поплавок 0,3x0,3-0,7x0,7 м и длиной..;
- надстройки увеличивают угол заливания, однако если он неизменен, бортовые полавки наилучшим образом обеспечивают работу восстанавливающих сил, препятствующих наклонению до этого угла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войтенко М.Д. Позорная статья – гибель Булгарии и торжество инстинктов [Электронный ресурс] / М.Д. Войтенко // Морской Бюллетень Совфрахт. – 2011. – Режим доступа: <http://www.sovfracht.info/?PageID=2928> Sunday, 4 September 2011 18:38:42*
2. *Крылов А.Н. Учебник теории корабля / А.Н.Крылов. – СПб.: Ю.Н. Эрлихъ, 1913. – 211 с.*
3. *Российский морской Регистр судоходства/ Правила классификации и постройки морских судов. – Т. 1 / Отв. за выпуск Е.Б. Мюллер. – СПб.: ГУП «Типография «Наука», 2011. – 489 с.*
4. *Семенов-Тянь-Шанский В.В. Статика и динамика корабля / В.В. Семенов-Тянь-Шанский. – Л.: Судостроение, 1973. – 608 с.*

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

УДК 629.123.3

Сёмин А.А.

**УЧЕТ КРИТЕРИЯ КОМФОРТАБЕЛЬНОСТИ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ
ВНУТРЕННЕГО И СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ**

Разработаны способы определения уровня конструктивной комфортабельности; потребных значений площадей палуб и помещений; главных элементов судна с учетом конструктивной комфортабельности и района плавания; оценки рыночной стоимости и эффективности содержания судна.

Ключевые слова: *пассажирское судно внутреннего и смешанного района плавания, проектирование, конструктивная комфортабельность.*

Розроблені способи визначення рівня конструктивної комфортабельності; потрібних значень площ палуб і приміщень; головних елементів судна з врахуванням конструктивної комфортабельності і району плавання; оцінки ринкової вартості і ефективності експлуатації судна.

Ключові слова: *пасажи́рське судно внутрішнього і змішаного району плавання, проектування, конструктивна комфортабельність*

Ways of definition of level of constructive comfortableness are developed; necessary values of the areas of decks and locations; primary members of a vessel taking into account constructive comfortableness and a navigation area; estimations of market cost and efficiency of the contents of a vessel.

Keywords: *the passenger ship of the internal and mixed navigation area, projection, constructive comfortableness.*

Актуальность. Украина относится к числу европейских стран с достаточно протяженной системой судоходных внутренних водных путей. Существующий отечественный пассажирский флот внутреннего плавания быстро стареет физически и морально, поэтому развитие круизного туризма в Украине неизбежно связано с проблемой коренного обновления круизного флота.

В связи с тем, пассажирский флот в европейской части окончательно приобрел круизную специализацию, в настоящий момент, при проектировании пассажирских круизных судов выбор главных размерений и характеристик судна необходимо жёстко увязывать с уровнем комфортабельности. Современная теоретическая база проектирования ПСВСП конструктивно учитывающая уровень комфортабельности, выраженный в числовом виде, а также существующие риски и опасности, связанные с проектированием будущего судна – отсутствует.

Ни для кого не секрет, что некоторая часть ошибок, связанных с недостатками проработки концепции будущего пассажирского судна и его оборудования (по разным причинам), закладывается в проект еще на ранних стадиях. При дальнейшем проектировании такие ошибки существенно влияют на конструкцию судна и его технико-экономические показатели.

Цель исследования – повышение эффективности проектирования ПСВСП с учетом заданного уровня комфортабельности и района плавания проектируемого судна.

Достижение цели базируется на идентификации характеристик судна, представляющих собой факторы риска при проектировании, на анализе главных элементов существующих ПСВСП в Украине, России и Западной Европе, а также на социологических данных оценки степени влияния показателей комфортабельности на уровень комфортабельности всего судна в целом.

Задачи исследования.

1. Идентификация характеристик судна, представляющих собой факторы риска при проектировании.
2. Создание метода определения главных элементов ПСВСП с учетом ЗУК и района плавания.

Объектом исследования являются водоизмещающие пассажирские круизные суда внутреннего и смешанного плавания предназначенные для выполнения туристических рейсов продолжительностью свыше 24 часов, оборудованные пассажирскими каютами и общественными помещениями.

Предметом исследования являются риски, возникающие на ранних стадиях проектирования и способные негативно повлиять на эффективность проекта; уровень комфортабельности проектируемого судна; общая площадь судна; площадь внутренних помещений и открытых палуб; пассажироместимость; главные размерения и характеристики, которые обеспечивают коммерческую эффективность ПСВСП.

Изложение основного материала. Для определения и оценки факторов риска по отношению к ПСВСП были применены международные нормативные документы, посвященные методам оценки рисков [1, 2, 4, 5, 6, 7]. В данных нормативных документах приводятся методы определения рисков и оценки безопасности, связанной с безопасностью жизнедеятельности человека на судне, и самого судна, как инженерного сооружения. Методы "Consequence / probability matrix" и "Failure modes and effect analysis", приведенные в швейцарском сборнике «Техники оценки риска» издания 2009 г., рекомендованы для оценки рисков, к которым можно отнести и коммерческие риски, возникающие еще на этапе проектирования судна, связанных с его строительством и дальнейшей эксплуатацией. Указанные методы применены в данной работе совместно с методом "Formal safety assesment", рекомендованным ИМО. По рекомендациям указанного документа были идентифицированы опасности, которые

могут возникать при решении задач проектирования либо переоборудования ПСВСП и служить причинами неблагоприятных технико-эксплуатационных параметров ПСВСП.

В результате проведенных исследований была произведена вероятностная оценка влияния опасностей перечисленных выше и определен уровень риска. Значения уровня риска судов работающих под флагами Украины и России значительно превосходят значения, полученные для судов работающих под флагами стран ЕС, таким образом можно констатировать, что конструктивные особенности отечественных ПСВСП значительно ухудшают их коммерческую привлекательность на рынке круизных перевозок, по сравнению с западно-европейскими ПСВСП.

Построенные матрицы риска дают четкое представление о том, что наибольший риск представляют собой недостаточный уровень комфортабельности и моральное старение отечественных ПСВСП. Вместе с тем, ПСВСП эксплуатирующиеся в бассейнах западноевропейских рек в настоящий момент практически не подвержены высоким рискам, характерным для отечественных пассажирских судов.

Используя полученные результаты по оценке рисков, определен перечень характеристик ПСВСП, с которыми непосредственно связано качество будущего проекта:

- потребный уровень комфорта;
- общая площадь всех палуб, согласно потребного уровня комфорта;
- площадь функциональных блоков помещений;
- главные размерения и характеристики на основе полученных данных по площадям помещений;

Далее, на следующем этапе исследований была впервые произведена классификация ПСВСП по признаку комфортабельности, а также идентифицированы показатели комфортабельности ПСВСП.

На основе проведенной идентификации и анализа показателей комфортабельности ПСВСП отечественной и зарубежной постройки установлены минимально необходимые требования к номенклатуре показателей комфортабельности для ПСВСП различных категорий комфортабельности и введены определения конструктивной и сервисной комфортабельности.

В рамках этого же раздела исследований был разработан для ПСВСП способ определения коэффициента конструктивной комфортабельности K_k .

В результате анкетного опроса ряда экспертов (54 чел.), были получены коэффициенты влияния для каждого показателя комфортабельности и выведена формула определения коэффициента конструктивной комфортабельности для ПСВСП, который может быть введен в формулы проектирования ПСВСП в числовом виде. Впервые разработанный способ позволяет более объективно подходить к оценке комфортабельности

существующих и проектируемых судов, и учитывает недостатки ранее опубликованных методов.

Следующим этапом стала разработка комплекса формул для определения общей площади ПСВСП, учитывающий требуемый уровень комфортабельности на борту судна в виде коэффициента конструктивной комфортабельности K_k , введенного в формулу определения общей площади комплекса помещений для пассажиров. Таким образом, в рамках данного комплекса формул, создан способ, позволяющий определять значения общей площади судна, суммарной площади комплекса помещений для пассажиров и суммарной площади помещений не связанных с обслуживанием пассажиров, в зависимости от уровня комфортабельности проектируемого судна.

Далее, на основе составленной автором классификации внутренних помещений и открытых палуб ПСВСП, были разработан комплекс формул, позволяющих определять площади всех помещений и открытых палуб, в зависимости от категории комфортабельности проектируемого судна.

Путем проведения статистического анализа созданной автором базы данных ПСВСП (около 70 пассажирских судов последних 10 лет постройки), были уточнены граничные значения относительных площадей судовых помещений в соответствии с предложенной пятизвездочной классификацией комфортабельности пассажирских судов.

В связи с тем, что мои исследования касаются судов работающих в различных речных системах, а также и в смешанном сообщении, по результатам анализа главных размерений составлена классификация ПСВСП на основе классификации ЕВВП [3]. В зависимости от района плавания (речного бассейна) ПСВСП разделены на два класса и пять подклассов.

Далее предложен комплекс формул, позволяющих определять главные размерения, весовые и пропульсивные характеристики проектируемых ПСВСП.

При этом, впервые предложена формулы определения числа ярусов в корпусе и надстройке p и конструктивной длины судна L в зависимости от общей площади судна S_{III} , которая определяется в зависимости от K_k .

По результатам статистических исследований, уточнены составляющие уравнения (типа Александра) определения коэффициента общей полноты C_b для пассажирских судов смешанного плавания (подклассов 2.1-2.2) и предложены формулы определения дедвейта d_w , а также статистический диапазон значений относительного водоизмещения порожнем $\Delta'_{пор}$.

Путем преобразования формулы адмиралтейских коэффициентов автором выведено уравнение определения мощности главной энергетической установки N_e . Для определения суммарной мощности вспомогательной энергетической установки $N_{дг}$ предложена формула, для которой

приведен диапазон коэффициентов относительной мощности в зависимости от пассажироместимости судна.

В формуле определения поперечной метацентрической высоты h диссертантом уточнен диапазон значений коэффициента a_3 зависящего от количества ярусов судна и его нагрузки.

Составлен алгоритм проектирования ПСВСП.

В основу способа оценки экономической эффективности содержания судна был положен показатель условного относительного расхода топлива $R_{\text{топл}}$ соотнесенный с пассажироместимостью судна. Помимо этого, для прогноза и определения оптимального уровня затрат, связанных с расходом топлива была выведена формула, учитывающая навигационный период судна H_n , долю чистого ходового времени $t_{\text{ход}}$ и уровень загрузки судна пассажирами k_3 . Также была получена формула оценки рыночной стоимости судна C_p , с учетом прогноза на перспективу, в основе которой лежит относительный показатель рыночной стоимости C' отнесенный к кубическому модулю судна.

Таким образом, в рамках данных исследований впервые были разработаны способы:

- определения уровня конструктивной комфортабельности;
 - определения потребных значений площадей палуб и помещений;
 - определения главных элементов с учетом K_k и района плавания;
 - оценки рыночной стоимости и эффективности содержания судна.
- Способы могут применяться как отдельно, так и в совокупности.

Выводы. Практическое значение полученных результатов состоит в том, что значения результатов исследований, которые получены в работе, позволяют помимо собственно проектирования проводить анализ предконтрактных предложений по строительству новых ПСВСП; использовать отдельные части работы при выполнении проектов переоборудования и модернизаций существующих судов с целью повышения их уровня комфортабельности, увеличения пассажироместимости и повышения рентабельности; использовать в исследовательских работах; проводить сравнительную оценку и классификацию уже существующих ПСВСП по признаку комфортабельности, что даёт возможность сравнения между собой пассажирских каютных судов (как круизных, так и линейных), работающих в различных речных бассейнах, различных по конструкции, концепции, возрасту и техническому состоянию.

Результаты исследований и разработанные методы могут быть использованы в проектных и конструкторских организациях, судоходных и туристических компаниях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты: ГОСТ Р 51898-2002.* – [Действует с 2002-05-06]. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 6 с.
2. *Менеджмент риска. Термины и определения: ГОСТ Р 51897–2002.* – [Действует с 2002-05-30]. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 7 с.
3. *Шпигельман Я.Е. Дунай в Единой сети европейских внутренних водных путей / Я.Е. Шпигельман – Одесса.: Судоходство, 1998.* – 56 с.
4. *Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process: MSC/Circ. 1023: 5 April 2002 / International Maritime Organization.* – 2002.
5. *Risk management – Principles and guidelines: ISO 31000:2009 (E).* – [Действуем с 2009-11-15]. – Geneva: International Organization for Standardization, 2009. – 24 p.
6. *Risk management – Risk assessment techniques: IEC/ISO 31010:2009.* – [Действуем с 2009-11]. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009. – 188 p.
7. *Risk management – Vocabulary: ISO GUIDE 73:2009 (E/F).* – [Действуем с 2009-01-01]. – Geneva: International Organization for Standardization, 2009. – 15 p.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011

АВТОРИ

Аврамов Володимир Васильович – старший викладач кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету

Баскаков Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедрой «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету

Бондаренко Олександр Валентинович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теорія та проектування корабля» Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Демідюк Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету

Душко Вероніка Ростиславівна – кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедрой «Океанотехніка та кораблебудування» Севастопольського національного технічного університету, м. Севастополь

Єгоров Геннадій В'ячеславович – доктор технічних наук, професор, ген.директор Морського інженерного бюро, м. Одеса

Єфремова Ніна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету

Жибосдов В'ячеслав Володимирович – старший викладач кафедри «Океанотехніка та кораблебудування» Севастопольського національного технічного університету, м. Севастополь

Іванова Ольга Олександрівна – старший викладач кафедри «Океанотехніка та кораблебудування» Севастопольського національного технічного університету, м. Севастополь

Кабанова Наталія Миколаївна – доцент кафедри «Теорія та проектування корабля» Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Корнієнко Олександр Олександрович – пошукач кафедри «Океанотехніка та корабле-будування» Севастопольського національного технічного університету, м. Севастополь, інженер-стажор Кримського

відділення ЧАО «Регио-нальное Управление Российского морского Регистра Судоходства»

Кушнір Володимир Моїсейович – доктор технічних наук, головний науковий співробітник Морського гідрофізичного інституту НАН України, професор кафедри «Океанотехніка та кораблебудування» Севастопольського національного технічного університету, м. Севастополь

Мартинєць Борис Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Конструкція корпусу» Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Морєва Ірина Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Океанотехніка та кораблебудування» Севастопольського національного технічного університету, м. Севастополь

Морозова Ірина Володимирівна – доктор економічних наук, професор, ректор Одеського національного морського університету

Некрасов Валерій Олександрович – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри «Теорія та проектування корабля» Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Печенюк Андрій Володимирович – аспірант кафедри «Теорія та устрій судна» Одеської національної морської академії

Потравко Олексій Сергійович – аспірант кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету

Раков Олексій Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри «Океанотехніка та кораблебудування» Севастопольського національного технічного університету, м. Севастополь

Сьомін Олексій Анатолійович – начальник департаменту суднобудування ООО «Лігір»

Ткаченко Юрій Миколайович – аспірант кафедри «Конструкція корпусу» Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Цибенко Микола Олександрович – кафедри «Конструкція корпусу» Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Штрамбранд Володимир Ілліч – начальник управління розвитку та будови флоту ФГУП «Росморпорт», м. Москва

ВИМОГИ ДО АВТОРСЬКИХ ТЕКСТОВИХ ОРИГІНАЛІВ

Редакційна колегія збірника наукових праць запрошує науковців до співробітництва в галузі інформування науково-технічної громадськості про нові теоретичні і практичні досягнення у сфері функціонування різних видів транспорту.

У журналі публікуються оригінальні та оглядові статті проблемного і дискусійного характеру.

Статті публікуються на одній з трьох мов: українській, російській або англійській.

Стаття повинна задовольняти вимогам ВАК України до публікацій статей у періодичних наукових виданнях.

Редакційна колегія приймає лише наукові статті, які мають **такі елементи**: постановка проблеми, огляд останніх досліджень і публікацій з цієї проблеми, формулювання завдання дослідження, виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, висновки з цього дослідження, список використаних джерел.

Стаття має відповідати тематичному спрямуванню збірника і бути завізована власноручно підписом автора.

Матеріал необхідно викладати стисло, послідовно, стилістично грамотно. Терміни та позначення повинні відповідати чинним стандартам. Не допускаються повтори, зайві подробиці при переказі раніше опублікованих відомостей – замість цього подаються посилання на літературні джерела. Одиниці виміру слід подавати лише за міжнародною системою одиниць SI або в одиницях, допущених до застосування в Україні згідно до вимог чинних державних стандартів.

Рекомендований обсяг статті, що включається у збірник, **не менше 6 та не більше 15 сторінок**.

Для опублікування у збірнику необхідно до підписаної всіма авторами статті та рефератів додати такі документи:

- ✓ експертний висновок;
- ✓ рецензію фахівців з науковим ступенем за профілем статті (бажано доктора економічних наук), завірену печаткою;
- ✓ рекомендацію відповідної кафедри, лабораторії або наукового підрозділу, що рекомендує статтю до друку;
- ✓ авторську довідку, якщо автор подає рукопис до Видавництва ОНМУ вперше, з зазначенням місця роботи, посади, вчених ступенів і звань, адрес і телефонів.

Рішення про публікацію статті у збірнику приймає редакційна колегія на підставі висновку рецензентів про її наукове та практичне значення.

Вимоги до оформлення тексту статті

Редакційна колегія приймає до роботи диски і один примірник роздрукованого текстового оригіналу (файлів), що є на диску. Текстовий редактор Word – файли в форматі (Word 97-2003 & 6.0/95 RTF).

Необхідно додержуватись головної вимоги – відповідність шрифтів документа його формату. Оформлення рівнозначних фрагментів документа (заголовків, підписів під рисунками, формул тощо), позначень ідентифікаторів перемінних та констант повинно бути однаковим по всій роботі. Одна і та ж величина (фізична, хімічна, економічна тощо) повинна мати однакове начертання літер.

Текст набирається з додержанням нижченаведених правил:

- ✓ абзаци відокремлюються один від одного одним маркером кінця абзацу (застосування цього символу в інших цілях не допускається);
- ✓ усі слова всередині абзацу розділяються тільки одним пробілом;
- ✓ перед розділовим знаком пробіли не ставлять, після розділового знака – один пробіл;
- ✓ після ініціалів (перед прізвищем), перед скороченнями і між ними ставиться нерозривний пробіл;
- ✓ виділення курсивом, напівжирним, великими літерами забезпечуються засобами Word.

Розміри полів на сторінках видання

Розмір паперу – формат А4 210 x 297 мм.

- ✓ верхнє – 2 см;
- ✓ нижнє – 3 см;
- ✓ ліве – 2,5 см;
- ✓ праве – 1,5 см.

Стиль, рекомендований для друку – Times New Roman, 14 пт; рядковий;

вирівнювання – по ширині;
міжрядковий інтервал – одинарний;
заборона висячих рядків;
режим переносу слів – відключений.

Розстановка переносу слів ручним способом забороняється

У лівому куті статті зверху проставляється індекс УДК, ініціали та прізвища авторів передують заголовку і друкуються рядковими літерами – у правому куті.

Заголовок

- ✓ відступ – 0,75;
- ✓ шрифт – Arial Сут, 14 пт, великий;
- ✓ напівжирний;
- ✓ вирівнювання – вліво.

Анотація складається **обов'язково трьома мовами**: українською, російською та англійською (обсягом до 50 слів кожна).

Ключові слова – **обов'язково трьома мовами**: українською, російською та англійською (5-10 слів) наводяться після анотації.

Далі наводяться всі обов'язкові елементи наукової статті.

Вступ

- а) постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними задачами;
- б) короткий аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор;
- в) виділення невирішених раніше питань загальної проблеми, яким присвячується стаття.

Постановка задачі – формулювання мети статті.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів з поділом його на частини з відповідними назвами

У цьому розділі рекомендується висвітлити такі питання, як:

- а) ґрунтовний огляд існуючих рішень поставленої задачі (якщо це необхідно);
- б) актуальність поставленої задачі;
- в) вибір методів, підходів, моделей та інструментів розв'язку поставленої задачі;
- г) власне розв'язок поставленої задачі;
- д) адекватність теоретичних рішень та переваги практичних рішень над існуючими;
- е) приклади застосування отриманих результатів.

Висновки

- а) підсумки даного дослідження;
- б) перспективи подальших досліджень у цьому напрямку.

Література

Список літератури подається в порядку посилання. Неприпустиме посилання на неопубліковані та незавершені праці.

Редакційна колегія звертає увагу авторів на те, що назва статті повинна коротко і максимально точно відображати суть проведених досліджень.

Розміри для введення формул

- ✓ основний – 16 пт;
- ✓ крупний індекс – 12 пт;
- ✓ дрібний індекс – 10 пт;
- ✓ крупний символ – 18 пт;
- ✓ дрібний символ – 14 пт;
- ✓ перемінна – курсив (на 2 пт більше базового);
- ✓ функція и константи – прямий шрифт (на 2 пт більше базового);
- ✓ скорочення в індексах – прямий шрифт.

Математичні формули набирають тільки вбудованим редактором формул Microsoft Equation 3.0. Вони потребують однакового написання та розміщення елементів. Індеси та показники степеня повинні бути однаковими за розміром, але не більше ніж у два рази меншими за основну строку формули та однаково опущеними чи піднятими по відношенню до лінії основного рядка формули, щоб при зменшенні в 1,5 рази вони безпомилково читались.

Номери формул позначають арабськими цифрами у круглих дужках, розташовуючи їх біля правого краю полоси. У разі, якщо номер не вміщується у рядку формули, його виділяють у наступний за формулою черговий рядок. Біля формули, що займає декілька рядків, номер ставлять біля останнього рядка, біля формули-дробу – навпроти основної ділильної лінійки. Невеликим формулам у одному рядку, якщо вони складають єдину групу, присвоюють один загальний номер. Групу формул, розташованих окремими рядками, охоплюють справа чи зліва парантезом і номер групи розташовують проти його вістря, а якщо парантеза справа нема – проти середини цієї групи.

Якщо формула набирається у редакторі формул шрифтом Times курсивом, то і по тексту символи необхідно набирати курсивом, тобто символи по тексту повинні відповідати символам у редакторі формул.

Якщо формула набирається шрифтом Arial не курсивом, то і по тексту символи повинні відповідати формулі.

Рисунки набираються по тексту, повинні бути **згрупованими**, розмір не повинен перевищувати 10x12 см.

Підписи та надписи у графічних об'єктах (рисунках, схемах та т. інш.) неможна робити за допомогою інструменту надпису панелі інструментів (Рисування) у зв'язку з тим, що при збільшуванні чи зменшуванні графічних об'єктів текстові блоки викривлюються.

Для створення графічних об'єктів рекомендується використовувати графічні програми Paint, Corel Draw, AutoCad та інш.

Середня кількість ілюстрацій за обсягом не повинна перевищувати 20 % авторського тексту, що при розмірі 9x12 см складе 7-8 рисунків на авторській лист.

Якщо рисунок у статті один, то він не нумерується, посилання на нього робиться словом «рисунок» без скорочення, а під самим рисунком слово «рисунок» не пишеться. Підпис з експлікацією без підпису (теми зображення) неприпустиме.

Підпис завжди починають з великої літери, експлікації – з малої. Крапки у кінці підпису не ставлять. Після основного підпису, якщо далі йде експлікація, прийнято ставити двокрапку. Елементи експлікації відділяють один від одного крапкою з комою, а цифрові або буквені позначення від тексту пояснення – знаком тире.

Таблиці. Ширина таблиці повинна відповідати ширині текстового блоку видання. Розмір шрифту для набору таблиці – 14 кегль. Допускається розмір шрифту – 12 кегль.

Таблиці повинні бути надруковані у тексті після абзаців, що мають посилання на них. Таблиця має нумераційний заголовок та тематичний заголовок, що визначає її тему та зміст (без розділового знака на кінці).

Якщо в тексті одна таблиця, нумераційний заголовок не пишеться. Тематичний заголовок не пишеться у таблиці допоміжного характеру, у такій, що немає самостійного значення.

Основні вимоги до тематичного заголовка – точність, відповідність призначенню, зміст таблиці, виразність та короткість.

Над таблицею, що продовжується, пишеться нумераційний заголовок «Продовження табл. _ », якщо вона не закінчена, або «Закінчення табл. _ », якщо закінчена.

Текст таблиці не повинен виходити за лінії, що обмежують графі. Числа у таблиці, що мають більше чотирьох цифр, повинні ділитися на класи по 3 цифри, інтервалом у один пробіл (виняток номери та дати).

Таблиці повинні бути закритими з боків та внизу. Графу «Номер з/п» давати тільки тоді, коли є посилання на цю нумерацію.

Заголовки граф ставлять у називному відмінку однини чи множини без довільного скорочення слів.

У одноярусній головці усі заголовки пишуться з великої літери.

У дво- і багатоярусній головці заголовки верхнього ярусу пишуться з великої літери, а заголовки наступних ярусів – з великої літери, якщо вони граматично не підпорядковуються заголовку верхнього ярусу, що стоїть над ними.

Примітки та виноски за змістом таблиці необхідно друкувати тільки під таблицею.

Виноски позначаються зірочкою.

Матеріали і документи, які не повністю оформлені або не відповідають усім вимогам, не розглядаються.

УВАГА!

Матеріали, що подаються для опублікування, повинні бути актуальними, виключати паралелізм та дублювання.

Передрукування та будь-яке використання матеріалів здійснюється з обов'язковим посиланням на збірник.

Автори несуть повну відповідальність за науковий зміст, точність фактичних даних, посилань на джерело, а також ілюстративного матеріалу і цитат.

Редакція не завжди поділяє позицію авторів публікацій.

Приклади бібліографічного опису документа

Опис книги одного автора

Іванов О.К. Економічний аналіз: Учбовий посібник/ О.К. Іванов. – СПб.: Вид. СПбГТУ, 1998. – 88 с.

Опис книги двох авторів

Гаврикова Т.А. Дислокація в кристалах: Учебн. пособие / Т.А. Гаврикова, Б.А. Зыков. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – 72 с.

Опис книги трьох авторів

Сергеев К.Г. Физические методы контроля качества материалов и продукции: Учебн. пособие / К.Г. Сергеев, Н.А. Столярова, И.И. Горшков. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – 52 с.

Опис книги під редакцією

Пористые проницаемые материалы: Справ./ Под ред. С.В. Белова. – М.: Металлургия, 1987. – 333 с.

Опис методичних вказівок

Управление проектами: Метод. указания / В.П. Капитанов. – Одесса: Изд-во ОНМУ, 2005. – 37 с.

Опис складової частини видання

Ильф И.А. Источник веселья / И.А. Ильф, Е.П. Петров // Собр. соч.: В 5 т. – М., 1961. – Т.5. С.94-97.

Опис статті зі збірника, книги

Кириллов В.Н., Демидюк А.В., Тонюк В.И. Экспериментальная установка для исследования гидродинамических характеристик продольной качки моделей судов // Вісник ОДМУ. – Одеса: Вид-во ОДМУ. – 1998. – № 1. – С.90-93.

Опис статті з журналу

Вечорин Е.Л., Константин Петрович Боклевский / Е.Л. Вечорин // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 1999. – № 1(15). – С. 113.

Синтез перенасыщенных аналогов пенициллина / Е.Ф. Панарин, М.В. Соколовский, М.Б. Беров, М.А. Жукова // Изв. АН СССР. Сер. хим. – 1974. – № 10. – С. 2300-2303.

Опис статті з газети

Немировский Е.Л. Первопечатник Иван Федоров / Е.Л. Немировский // Лит.газ. – 1984. – 5 мая. – С.16.

Опис стандартів

ГОСТ 7.1-84 СИБИД. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила оформления. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 76 с.

Опис патентних документів

А.с. 1254421 СССР, МКИ G 03 G 15/00. Электрографический микрофильмирующий аппарат / А.Г. Арутюнов (СССР). Оpubл. 23.06.86. Бюл. № 32.

Опис авторефератів дисертацій

Касимовский Н.И. Разработка оксидного катализатора: Автореф. дис. ... канд. техн. наук // Н.И. Касимовский; ЛТИ им. Ленсовета. – Л., 1988. – 16 с.

Опис дисертації

Талишинский Р.Р. Документализм в публицистике: Дис. ... канд. филол. наук / Р.Р. Талишинский; Моск.гос.ун-т. – М., 1986. – 203 с.

Опис іноземних літературних джерел підпорядковується тим же правилам. Наприклад:

Wyner F. The wire-tap channel / A. Wyner // Bell Sistem Technical J. – 1975. – Vol. 54. – № 3. – P. 1355-1387.

ЗМІСТ

ТЕОРІЯ КОРАБЛЯ

Баскаков С.Н., Егоров Г.В., Морозова И.В. Вклад Ю.Л.Воробьева в кораблестроительную науку	4
Аврамов В.В., Печенюк А.В. Расчет напряженно-деформированного состояния гребного винта современными численными методами	40
Баскаков С.Н. Результаты расчетного и экспериментального исследования качки прямобортных понтонов на волнении	49
Демидюк А.В. Модернизация системы измерений опытового бассейна ОНМУ	67
Ефремова Н.В. Определение безопасных траекторий при движении малого судна вблизи крупнотоннажного судна, сидящего на мели	77
Кушнир В.М., Душко В.Р., Морева И.Н., Иванова О.А., Федоров С.В. Цифровая система для исследований океанотехнических систем в волновых бассейнах	85

ПРОЕКТУВАННЯ СУДЕН

Егоров Г.В. Предпосылки создания нового поколения танкеров смешанного плавания	102
Егоров Г.В., Штрамбранд В.И. Многофункциональные ледоколы и ледоколы-спасатели нового поколения	130
Бондаренко О.В., Некрасов В.О. Концепція комплексної оцінки ефективності, надійності та безпеки морських транспортних суден	151
Кабанова Н.Н. Решение стохастической задачи оптимизации характеристик трампового судна	172
Потравко А.С. Методы и критерии оптимизации при проектировании транспортных судов	184
Раков А.И., Жибоедов В.В. Оценка районов плавания с использованием теории риска	189

Ткаченко Ю.М., Мартинець Б.М., Цибенко М.О. До проблеми жорсткості форми м'якої повітряопорної циліндричної оболонки	200
Раков А.И., Корниенко А.А. Влияние дополнительных объемов формы корпуса на остойчивость	208
Семи́н А.А. Учет критерия комфортабельности при проектировании пассажирских судов внутреннего и смешанного плавания	214
АВТОРИ ЗБІРНИКА	220
ВИМОГИ ДО АВТОРСЬКИХ ТЕКСТОВИХ ОРИГІНАЛІВ	222

Наукове видання

ВІСНИК
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Збірник наукових праць

Випуск 34 (1)

Засновник – Одеський національний морський університет

*Українською, російською
та англійською мовами*

Видається з червня 1997 р.

Підписано до друку з оригінал-макету 22.05.12.
Формат 70x108/16. Папір офсетний. Ум. друк. арк. 14,4.
Замовлення № 212

Надруковано у Видавництві ОНМУ
65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34.

Тел. 728 31 14