НАУЧНЫЕ РАБОТЫ

Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

64
В.И. Костин. **Об одном методе расчета течений вязкой несжимаемой жидкости**

70
Е.А. Зайцев, И.А. Мещихин. **Мониторинг прочности металлоконструкций запорных гидравлических конструкций СГТС**

74
В.А. Катенин, А.В. Бойков. **Комплексное использование спутниковых и геоинформационных технологий на судах смешанного река–море плавания**

78
О.В. Леонова, Е.Г. Веретенников, А.С. Смирнова. **Обоснование безопасной эксплуатации портальных кранов**

81
В.Г. Фомин, П. Н. Карабутов. **Методика оптимизации эксплуатационных показателей флота судоходной компании**

Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций (СПГУВК)

84
А.В. Саушев. **Параметрическое управление состоянием динамических систем водного транспорта**

96 АННОТАЦИИ

Новосибирская государственная академия водного транспорта (НГАВТ)

88
О.В. Щербакова, М.К. Романченко. **Моделирование ожидаемых результатов оптимизации системы виброшумозащиты**

Речной учебно-методический центр (РУМЦ), МГАВТ

90
М.А. Иванов, О.В. Демченков. **Сравнительный анализ качества тренажерной подготовки судоводительского состава судов внутреннего плавания**

УЧРЕЖДЕНИЕ: Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

ТЕМА: Об одном методе расчета течений вязкой несжимаемой жидкости

АВТОР: В.И. КОСТИН, кандидат физико-математических наук, доцент

При расчете течений несжимаемой жидкости, рассматриваемой в рамках нестационарных уравнений Навье-Стокса, эффективным алгоритмом, позволяющим получать более чем удовлетворительные результаты, является метод МАС [1] и целый ряд его модификаций [2-4].

В основе данной схемы расчетов для уравнений, записанных в переменных «вектор скорости – давление», лежит идея определения давления [2] (или поправки к давлению [5]) при условии, что на каждом временном слое обращается в ноль величина дивергенции скорости.

Первоначальные попытки получения решения были связаны с применением явных алгоритмов вычисления независимых переменных на новых временных слоях [1-2]. Однако, при проведении расчетов течений с малой вязкостью, жесткие ограничения на критерий устойчивости используемых схем приводили к повышению требований к соответствующим вычислительным комплексам.

Одним из подходов, призванных ослабить такие требования, можно считать применение неявных разностных схем [3-7], обладающих большим запасом устойчивости.

Другим аспектом в плане получения решения удовлетворительного качества (с хорошими свойствами аппроксимации и монотонности) является выбор надлежащей аппроксимации исходных уравнений.

Для этого часто используют ориентированные разности на многоточечном шаблоне [8], что приводит к существенному усложнению алгоритма расчета при использовании неявных схем.

Альтернатива – схема расчетов, основанная на использовании трехточечного шаблона для аппроксимации конвективных и диффузионных членов, входящих в исходные уравнения [9, 4-7]. Ее преимущество заключается в том, что она обладает хорошими дисперсионными и диссипативными свойствами с высоким порядком аппроксимации: от третьего и выше [9-11], а получающаяся система линейных уравнений имеет трехдиагональную форму, которая легко решается методом прогонки. Так, в работах [4-7] применялись аппроксимации третьего порядка точности для конвективных членов уравнений, а диффузионные величины аппроксимировались с точностью O(h/Re). При больших числах Рейнольдса подобное приближение оказалось вполне удовлетворительным [4, 9], однако при решении задач общего вида требуется аппроксимация более высокого порядка.

В настоящей статье описывается алгоритм, который содержит аппроксимацию и конвективных, и диффузионных членов уравнений третьего порядка точности, позволяющий проводить исследования в широком диапазоне определяющих параметров течений неоднородной несжимаемой жидкости.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

В качестве предмета исследования выступает течение, получающееся в результате эволюции перемешанной жидкости в стратифицированной среде. При этом берется вязкая несжимаемая жидкость с линейной стратификацией плотности (или температуры) по глубине.

Представленная задача решается в рамках уравнений Навье-Стокса, записанных для переменных «вектор скорости – давление» в приближении Буссинеска, когда отличие плотности среды от ее невозмущенного значения учитывается только в силах плавучести.

Итак, изучаемое явление рассматривается в декартовой системе координат (O, x, y, z) или (O, x_1, x_2, x_3), причем начало координат совпадает с центром возмущенной области. Ось Ox направлена вдоль потока, Oz – вертикально вверх, а Oy дополняет систему координат до правой тройки.

Стратификация среды в невозмущенном состоянии определяется распределением плотности $\rho=\rho_o(z)$ (или температуры $T=T_o(z)$. Как известно, степень стратификации характеризуется частотой Брента-Вяйсяйля, получаемой из следующего соотношения:

$$N^2 = \frac{g}{\rho_*}\frac{\partial \rho_o}{\partial z}, \qquad (1.1)$$

где $\rho_* = \rho_o(0)$.

Если через u_1, u_2, u_3 обозначить проекции вектора скорости $\overline{V}$ на соответствующие оси координат, то согласно [2-5,12,13] течение вязкой несжимаемой жидкости описывается системой уравнений:

$$\frac{D\rho u_i}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho\nu\Delta u_i - \rho g_i, \qquad (1.2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad . \qquad (1.3)$$

Здесь $g_1=g_2=0$, $g_3=g$ – ускорение свободного падения, Δ – оператор Лапласа,

$\frac{Df}{Dt}$ – полная производная по времени.

В приближении Буссинеска система уравнений (1.2) примет вид (1.4):

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho_*}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu\Delta u_i - \frac{\rho}{\rho_*} g_i . \qquad (1.4)$$

Для определения величины плотности ρ (температуры T) к уравнениям (1.3)-(1.4) необходимо добавить выражение [3-5,14]:

$$\frac{D(\rho-\rho_o)}{Dt} = -u_i\frac{\partial \rho_o}{\partial x_i} . \qquad (1.5)$$

Таким образом, исследуемая задача решается в рамках системы уравнений (1.3)-(1.5). Если L, U и L/U выбрать в качестве характерных значений масштабов длины, скорости

и времени рассматриваемого явления, то в уравнениях (1.3)-(1.5) можно перейти к безразмерным величинам.

$$\nu_i = \frac{u_i}{U}, \quad y_i = \frac{x_i}{L}, \quad \tau = \frac{Ut}{L}. \qquad (1.6)$$

При этом безразмерное возмущение плотности вводится формулой:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho - \rho_o}{L\dfrac{\partial \rho_o}{\partial z}}. \qquad (1.7)$$

Величину давления обычно рассматривают в виде:

$$\frac{\partial \pi}{y_i} = \frac{1}{\rho_*}\left(\frac{\partial \rho}{\partial y_i} + \rho g_i\right). \qquad (1.8)$$

Следовательно, проведя процедуру обезразмеривания исходных уравнений, легко получить следующие соотношения:

$$\frac{\partial \nu_i}{\partial y_i} = 0, \qquad (1.9)$$

$$\frac{D\nu_i}{D\tau} = -\frac{\partial \pi}{\partial y_i} + \frac{1}{\mathrm{Re}}\Delta\nu_i - \frac{\bar{\rho}}{Fr^2}\delta_{i3}, \qquad (1.10)$$

$$\frac{D\bar{\rho}}{D\tau} = -\nu_i\delta_{i3}. \qquad (1.11)$$

Здесь безразмерные числа Рейнольдса и Фруда определены как:

$$\mathrm{Re} = \frac{UL}{\nu}, \quad \mathrm{Fr} = \frac{U}{NL}, \qquad (1.12)$$

где N – период Брента-Вяйсяйля (1.1).

В рамках проводимой работы взята перемешанная жидкость, область перемешивания которой представляет собой бесконечный цилиндр радиуса L с образующей – осью 0x.

Итак, рассматривается нестационарное течение, генерируемое участком перемешанной жидкости ($y^2+z^2 \le L^2$) при наличии устойчивой стратификации невозмущенного потока $\rho=\rho_o(z)$ с частотой Брента-Вяйсяйля (1.1).

В начальный момент времени жидкость покоится, а плотность внутри перемешанной области («пятна») постоянна:

$$\nu(0,y,z) = w(0,y,z) = 0,$$

$$\rho(0,y,z) = \rho_* = const. \qquad (1.13)$$

Для линейной стратификации:

$$\rho_o(z) = \rho_*(1-\alpha z). \qquad (1.14)$$

Следовательно, в начальный момент времени ($\tau=0$) поскольку вне «пятна» жидкость покоится, в этой области $\bar{\rho} = 0$, а внутри (в соответствии с формулами (1.7), (1.13)-(1.14)) $\bar{\rho} = -z$:

$$\bar{\rho} = \begin{cases} 0 \text{ при } y^2 + z^2 \geqslant L^2 \\ -z \text{ при } y^2 + z^2 \leqslant L^2 \end{cases}. \qquad (1.15)$$

При этом давление, вычисленное по формуле (1.8), задается интегрированием величины $\rho(y,z)$ так, чтобы оно соответствовало гидростатическому соотношению во всей расчетной области [3-5]:

$$\pi(0,y,z) = \frac{1}{Fr^2}\int \bar{\rho}(y,z)dz. \qquad (1.16)$$

В результате сформулирована задача об эволюции «пятна» в устойчиво стратифицированной среде (1.14) с начальными условиями (1.13), (1.15)-(1.16), которая описывается системой уравнений (1.9)-(1.11).

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Для численного решения полученной системы уравнений (1.9)-(1.11) в расчетной области вводится разностная сетка ω_h с узлами, имеющими координаты (t_m, y_i, z_j):

$$\omega_h: t_m=(m-1)\tau,\ y_i=(i-1)h_y,\ z_j=(j-1)h_z. \qquad (2.1)$$

Значения всех функций, входящих в рассматриваемые уравнения, задаются в узлах сетки ω_h (2.1):

$$f_{ij}^m = f(t_m, y_i, z_j). \qquad (2.2)$$

Решение указанной системы уравнений основано на определении поправки к давлению из уравнения Пуассона с некоторой правой частью, которая получается из условия несжимаемости $t=t_m$ на каждом временном слое [3-5].

Согласно [3-5, 12-14] уравнения (1.10) можно записать:

$$\frac{\partial \nu_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \nu_i \nu_k}{\partial y_k} = -\frac{\partial \pi}{\partial y_i} + \frac{1}{\mathrm{Re}}\Delta\nu_i - \frac{\bar{\rho}}{Fr^2}\delta_{i3}. \qquad (2.3)$$

Если ввести оператор

$$L(f_m) = \frac{\partial f_m \nu_k}{\partial y_k} - \frac{1}{\mathrm{Re}}\Delta f_m + \frac{\bar{\rho}}{Fr^2}\delta_{i3}, \qquad (2.4)$$

то соотношения (1.10) примут вид:

$$\frac{\partial \nu_i}{\partial \tau} + L(\nu_i) = -\frac{\partial \pi}{\partial y_i}, \qquad (2.5)$$

или для каждой из компонент вектора скорости:

$$\frac{\partial \nu}{\partial \tau} + L(\nu) = -\frac{\partial \pi}{\partial y}, \qquad (2.6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + L(w) = -\frac{\partial \pi}{\partial z}. \qquad (2.7)$$

Оба уравнения (2.6) и (2.7) решаются в два шага, например для (2.6) имеем:

I. $$\frac{\tilde{\nu} - \nu^m}{\tau} + L(\tilde{\nu}) = -\left\langle \frac{\partial \pi^m}{\partial y} \right\rangle, \qquad (2.8)$$

II. $$\frac{\nu^{m+1} - \nu^m}{\tau} + L(\tilde{\nu}) = -\left\langle \frac{\partial \pi^{m+1}}{\partial y} \right\rangle. \qquad (2.9)$$

Здесь

$\left\langle \frac{\partial \pi}{\partial y} \right\rangle^m$ – некоторый разностный аналог производной от давления.

Из (2.8) и (2.9) следует:

$$\nu^{m+1} = \tilde{\nu} - \tau \left\langle \frac{\partial(\pi^{m+1} - \pi^m)}{\partial y} \right\rangle. \qquad (2.10)$$

Аналогично, применяя процедуру (2.8)-(2.9) к уравнению (2.7), легко получить:

$$w^{m+1} = \tilde{w} - \tau < \frac{\partial(\pi^{m+1} - \pi^{m})}{\partial z} > . \quad (2.11)$$

Теперь, дифференцируя уравнения (2.10) и (2.11) по y и z соответственно и складывая полученный результат, можно получить уравнение для поправки к давлению $\delta\pi = \pi^{m+1} - \pi^{m}$:

$$< \frac{\partial v^{m+1}}{\partial y} > + < \frac{\partial w^{m+1}}{\partial z} > = < \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} > + < \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} > -$$

$$-\tau < \frac{\partial^2(\delta\pi)}{\partial y^2} > -\tau < \frac{\partial^2(\delta\pi)}{\partial z^2} > . \quad (2.12)$$

С учетом несжимаемости жидкости, на каждом временном шаге должно выполняться условие (1.9), то есть справедливо:

$$< \frac{\partial v^{m+1}}{\partial y} > + < \frac{\partial w^{m+1}}{\partial z} > = 0 , \quad (2.13)$$

следовательно, из (2.12) получается:

$$< \frac{\partial^2(\delta\pi)}{\partial y^2} > + < \frac{\partial^2(\delta\pi)}{\partial z^2} > =$$

$$= \frac{1}{\tau}\left[< \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} > + < \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} > \right]. \quad (2.14)$$

Это и есть искомое уравнение Пуассона для поправки к давлению.

Таким образом, алгоритм решения исходной системы уравнений следующий (вычисление неизвестных величин на временном слое $t=t_{m+1}$ по известным значениям функций на m-м слое $t=t_m$):

1. Из соотношения типа (2.8) определяются компоненты скорости $\tilde{v}$ и $\tilde{w}$.
2. Из уравнения Пуассона (2.14) находится поправка к давлению $\delta\pi$.
3. По формулам (2.10) и (2.11) вычисляются точные значения скорости v^{m+1} и w^{m+1}.
4. Из выражения (1.11) получается значение плотности $\bar{\rho}^{m+1}$.

АППРОКСИМАЦИЯ ИСХОДНЫХ УРАВНЕНИЙ

Достаточно подробное обсуждение вопроса аппроксимации разностного оператора L, введенного формулой (2.4), было проведено в работе [5]. Там было отмечено, что для задач рассматриваемого типа, когда требуется описания течений, содержащих сильные неоднородности, требуются разностные схемы, обладающие большим запасом устойчивости и имеющие хорошие свойства монотонности и диссипации. Как показано в целом ряде работ [4-7, 9-11], такими свойствами обладают компактные аппроксимации повышенной точности (выше второго порядка).

Очевидно, что согласно (2.4) оператор L можно записать в виде:

$$L(f) = \frac{\partial fv}{\partial y} + \frac{\partial fw}{\partial z} - \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\bar{\rho}}{Fr^2}\frac{g_i}{g}. \quad (3.1)$$

Не ограничивая общности, для целей аппроксимации можно рассмотреть данный оператор без учета последнего слагаемого:

$$\hat{L}f = \frac{\partial fv}{\partial y} - \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial fw}{\partial z} - \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = (\hat{L}_y + \hat{L}_z) f. \quad (3.2)$$

Далее оператор $\hat{L}_y$ можно представить в виде:

$$\hat{L}_y f = \frac{\partial}{\partial y}\left(v - \frac{1}{Re}\frac{\partial}{\partial y} \right) f . \quad (3.3)$$

Разностная аппроксимация для него проводится следующим образом:

$$(\hat{L}_y f)_h = A_y^{-1}\bar{L}_y(f) + O(h^3),$$

причем

$$\bar{L}_y(f) = \Delta_y\left(v - \frac{1}{Re} A_y^{*-1}\Delta_y^{*} \right) f . \quad (3.4)$$

Таким образом, аппроксимация конвективных членов осуществляется парой трехточечных операторов:

$$< \frac{\partial f}{\partial y} >_h = A_y^{-1}\Delta_y f = \frac{\partial f}{\partial y} + O(h^3), \quad (3.5)$$

а диффузионный член вычисляется:

$$< \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} >_h = A_y^{-1}\Delta_y A_y^{*-1}\Delta_y^{*} f = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + O(h^3), \quad (3.6)$$

где

A_y^{*} и Δ_y^{*} – операторы, сопряженные соответственно операторам A_y и Δ_y.

Введенные разностные операторы определяются формулами:

$$A_y f = \left(A_0 - \frac{S}{4}\Delta_0 \right) f , \ \Delta_y f = \frac{1}{2h}(\Delta_0 - S\Delta_2) f , \quad (3.7)$$

$$A_y^{*} f = \left(A_0 - \frac{S}{4}\Delta_0 \right) f , \ \Delta_y^{*} f = \frac{1}{2h}(\Delta_0 - S\Delta_2) f. \quad (3.8)$$

Разностные операторы A_0, Δ_0, Δ_2 имеют вид:

$$A_0 f_i = \frac{1}{6} f_{i-1} + \frac{4}{6} f_i + \frac{1}{6} f_{i+1} ,$$

$$\Delta_0 f_i = f_{i+1} - f_{i-1}, \quad \Delta_2 f_i = f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1} .$$

В качестве s принимается S=signV.

Следовательно, применяя компактные разности (3.5)-(3.8) к уравнениям (1.9)-(1.11), в форме (2.5) можно получить разностную схему решения. Так, для скорости v получается следующее соотношение:

$$\frac{\tilde{v} - v^{m}}{\tau} + A_y^{-1}\bar{L}_y(\tilde{v}) + A_z^{-1}\bar{L}_z(\tilde{v}) = -< \frac{\partial \pi^{m}}{\partial y} >. \quad (3.9)$$

Если ввести обозначение (3.10), то (3.9) примет вид (3.11)-(3.12), поскольку будет справедливо выражение:

$\tilde{v} = v^{m} + \tau\varepsilon$, где E – единичный оператор:

$$\varepsilon = \frac{\tilde{v} - v^{m}}{\tau}, \quad (3.10)$$

$$E\varepsilon + A_y^{-1}\bar{L}_y(v^{m} + \tau\varepsilon) + A_z^{-1}\bar{L}_z(v^{m} + \tau\varepsilon) =$$

$$= -< \frac{\partial \pi^{m}}{\partial y} >. \quad (3.11); \quad E\varepsilon + \tau A_y^{-1}\bar{L}_y(\varepsilon) + \tau A_z^{-1}\bar{L}_z(\varepsilon) =$$

$$= -A_y^{-1}\bar{L}_y(v^{m}) - A_z^{-1}\bar{L}_z(v^{m}) - < \frac{\partial \pi^{m}}{\partial y} >. \quad (3.12)$$

Соотношение (3.12) удобно представить в виде:

$$[E+\tau A_y^{-1}\overline{L}_y+\tau A_z^{-1}\overline{L}_z]\varepsilon=\varphi^m\ , \qquad (3.13)$$

где

$$\varphi^m=-A_y^{-1}\overline{L}_y(\nu^m)-A_z^{-1}\overline{L}_z(\nu^m)-<\frac{\partial\pi^m}{\partial y}>. \qquad (3.14)$$

Выражение (3.13) допускает факторизацию (с погрешностью $[O(\tau)^2]$):

$$[E+\tau A_y^{-1}\overline{L}_y][E+\tau A_z^{-1}\overline{L}_z]\varepsilon=\varphi^m. \qquad (3.15)$$

Полученное уравнение решается в два приема:
– вводится новая переменная

$$\xi=[E+\tau A_y^{-1}\overline{L}_y]\varepsilon\ , \qquad (3.16)$$

и относительно нее решается уравнение (3.15), принявшее вид (3.17):

$$[E+\tau A_z^{-1}\overline{L}_z]\xi=\varphi^m\ . \qquad (3.17)$$

После определения из (3.17) величины ξ находится искомое значение ε из соотношения (3.16) и далее – из формулы (3.10) – искомая переменная $\tilde{\nu}$.

Более подробно процедура вычисления неизвестной величины ε выглядит следующим образом.

Очевидно, уравнения (3.16)-(1.17) записываются в виде:

$$[A_z+\tau\overline{L}_z]\xi=A_z[\varphi^m], \qquad (3.18)$$

$$[A_y+\tau\overline{L}_y]\varepsilon=A_y[\xi]\ . \qquad (3.19)$$

Теперь, поскольку оператор L имеет вид (3.4), то из (3.18) следует:

$$[A_z+\tau\Delta_z\left(w-\frac{1}{Re}A_z^{*-1}\Delta_z^*\right)]\xi=A_z[\varphi^m]. \qquad (3.20)$$

Очевидно, для решения полученного уравнения помимо A_z необходимо обратить оператор A_z^*.

Предлагается следующий алгоритм.

Вводится новая переменная $\vartheta=A_z^{*-1}\Delta_z^*\xi$, и вычисляются две переменные ξ и ϑ из уравнений (3.21)-(3.22):

$$[A_z+\tau\Delta_z w]\xi-\frac{\tau}{Re}\Delta_z(\vartheta)=A_z[\varphi^m], \qquad (3.21)$$

$$\Delta_z^*\xi-A_z^*\vartheta=0. \qquad (3.22)$$

Полученные соотношения можно записать в матричном виде:

$$\begin{pmatrix}[A_z+\tau\Delta_z w] & -\frac{\tau}{Re}\Delta_z\\ \Delta_z^* & -A_z^*\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\xi\\ \vartheta\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}A_z\varphi^m\\ 0\end{pmatrix} \qquad (3.23)$$

и, если ввести обозначения:

$$G=\begin{pmatrix}[A_z+\tau\Delta_z w] & -\frac{\tau}{Re}\Delta_z\\ \Delta_z^* & -A_z^*\end{pmatrix},\vec{x}=\begin{pmatrix}\xi\\ \vartheta\end{pmatrix},\vec{f}=\begin{pmatrix}A_z[\varphi^m]\\ 0\end{pmatrix}, \qquad (3.24)$$

то получится следующая система линейных уравнений:

$$G\vec{x}=\vec{f} \qquad (3.25)$$

с известными матрицей G и вектором правой части $\vec{f}$. Поскольку все операторы A и Δ, как показано выше, определяются по трехточечному шаблону, то матрица G будет иметь трехдиагональный вид и, следовательно, соотношение (3.25) можно записать в каждой точке разностной сетки ω_h:

$$A_j\vec{x}_{j-1}+B_j\vec{x}_{j+1}-C_j\vec{x}_j=\vec{f}_j,\ j=2,\ldots,N-1. \qquad (3.26)$$

Очевидно, к полученным уравнениям необходимо добавить условия на границах рассматриваемой области решения: $\vec{x}_1=\psi_1\vec{x}_2+\vec{\mu}_1\ ,\ \vec{x}_N=\psi_N\vec{x}_{N-1}+\vec{\mu}_N.$

Полученная система уравнений решается методом векторной прогонки [15]:

$$\vec{x}_{j+1}=K_{j+1}\vec{x}_j+\vec{e}_{j+1}, \qquad (3.27)$$

где K_{j+1} – матрица, а $\vec{e}_{j+1}$ – вектор.

Подставляя (3.27) в (3.26), легко получить:

$$A_j\vec{x}_{j-1}+B_jK_{j+1}\vec{x}_j+B_j\vec{e}_{j+1}-C_j\vec{x}_j=\vec{f}_j. \qquad (3.28)$$

откуда следует:

$$\vec{x}_j=(C_j-B_jK_{j+1})^{-1}A_j\vec{x}_{j-1}+$$
$$+(C_j-B_jK_{j+1})^{-1}(B_j\vec{e}_{j+1}-\vec{f}_j). \qquad (3.29)$$

Поскольку согласно (3.27)

$$\vec{x}_i=K_i\vec{x}_{i-1}+\vec{e}_i, \qquad (3.30)$$

то справедливы рекуррентные соотношения:

$$K_j=(C_j-B_jK_{j+1})^{-1}A_j\ ,$$
$$\vec{e}_j=(C_j-B_jK_{j+1})^{-1}(B_j\vec{e}_{j+1}-\vec{f}_j). \qquad (3.31)$$

Используя заданные граничные условия:

$$\vec{x}_N=\psi_N\vec{x}_{N-1}+\vec{\mu}_N, \qquad (3.32)$$

$$\vec{x}_1=\psi_1\vec{x}_2+\vec{\mu}_1, \qquad (3.33)$$

можно определить коэффициенты прогонки (3.27): матрицы K_j и вектора $\vec{e}_j$ для значений j=2, …, N. То есть, в соответствии с (3.27):

$$\vec{x}_N=K_N\vec{x}_{N-1}+\vec{e}_N\ . \qquad (3.34)$$

Из (3.32) и (3.34) получется:

$$K_N=\psi_N\ ,\vec{e}_N=\vec{\mu}_N. \qquad (3.35)$$

Соотношения (3.27) и (3.33) дают:

$$\vec{x}_1=\psi_1\vec{x}_2+\vec{\mu}_1=\psi_1(K_2\vec{x}_1+\vec{e}_2)+\vec{\mu}_1, \qquad (3.36)$$

откуда следует:

$$\vec{x}_1=(E-\psi_1K_2)^{-1}(\psi_1\vec{e}_2+\vec{\mu}_1)\ . \qquad (3.37)$$

Таким образом, алгоритм решения системы уравнений (3.26) следующий:

1. Граничные условия (3.32) дают соотношения (3.35): $K_N=\psi_N$ и $\vec{e}_N=\vec{\mu}_N$.
2. По формулам (3.31) определяются коэффициенты прогонки K_j и $\vec{e}_j$.
3. Из граничных условий (3.33) и коэффициентов прогонки находится значение искомого вектора (3.37) на левой границе $\vec{x}_1=(E-\psi_1K_2)^{-1}(\psi_1\vec{e}_2+\vec{\mu}_1)$.

4. По формулам прогонки (3.27) вычисляются величины $\vec{x}_j$ во всех оставшихся точках j=2, …, N.

Аналогичным образом определяется неизвестное значение E из уравнения (3.19).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

С помощью предложенного алгоритма было проведено численное исследование рассмотренной выше задачи об эволюции перемешанной жидкости («пятна»).

Приведенные результаты расчетов относятся к случаю, когда число Фруда Fr=1, а величина числа Рейнольдса варьировалась: Re=3·10^2; 1·10^3; 3·10^3; 1·10^4; 3·10^5.

На рис. 1-4 представлено распределение скорости ν(y) на оси «пятна» (z=0) в моменты времени t=3, t=6, t=9, t=12 для различных значений числа Re.

Приведенные данные показывают, что конфигурация поперечной скорости течения в рассматриваемом диапазоне числа Рейнольдса на протяжении всего времени исследования носит монотонный характер, а при значении числа Рейнольдса Re>1,104 решение практически не меняется, незначительно видоизменяясь в области сильных неоднородностей, начиная с момента времени t=9. На начальной стадии эволюции «пятна» (рис. 1) наблюдается слабая зависимость поперечной скорости течения от величины числа Рейнольдса.

На следующих четырех рисунках представлено распределение вертикальной скорости по глубине w(z) в различные моменты времени для широкого диапазона числа Рейнольдса. Здесь рассмотренная характеристика течения дается как в центре возмущенной области (рис. 5-7), так и в зоне максимальных амплитуд (рис. 8).

Распределение функции плотности в центре возмущения и в зоне максимальных амплитуд показано на рис. 9-12. Как и для уже рассмотренных характеристик исследуемого течения – величин скорости, приведенные данные свидетельствуют о монотонном поведении функции плотности на протяжении всего представленного временного интервала T≤12 во всем диапазоне числа Рейнольдса 3,1o^2≤Re≤3,1o^5.

Следующие два рисунка демонстрируют поведение величин вертикальной скорости и плотности течения вдоль горизонтальной оси w(y) и ρ(y), проходящей через уровень максимальных возмущений течения (z=1,35). Здесь также во всем диапазоне рассматриваемого числа Рейнольдса наблюдаются монотонные профили исследуемых функций.

Приведенные результаты расчетов показывают, что применение компактных аппроксимаций для решения исходных уравнений дает вполне удовлетворительное описание рассматриваемых процессов, содержащих сильные неоднородности.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Harlow F., Welch J. Numerical calculation of time-dpendent viscous incompressible flow of fluid with free surface. - Physics of Fluids, 1965, v.8, №12, pp.2182-2189.
2. Белоцерковский О.М., Гущин В.А., Щенников В.В. Метод расщепления в применении к решению задач динамики вязкой несжимаемой жидкости // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1975. Т.15. №1. С.197-207.
3. Даниленко А.Ю., Костин В.И., Толстых А.И. О неявном алгоритме расчета течений однородной и неоднородной жидкости. М.: ВЦ АН СССР, 1985.
4. Костин В.И. Численное моделирование некоторых задач

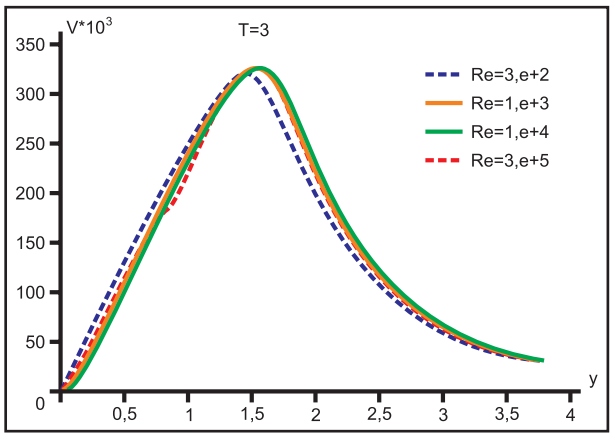

Рис. 1.

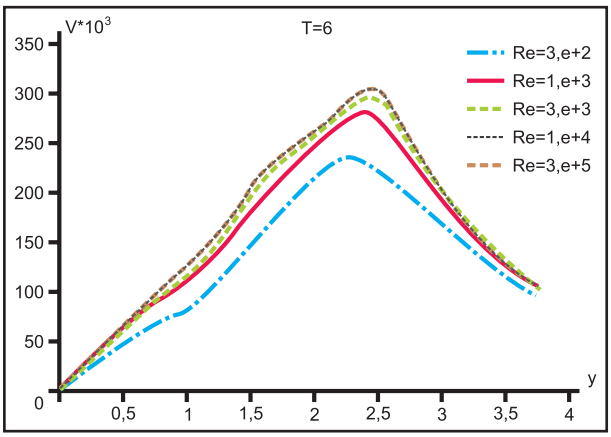

Рис. 2.

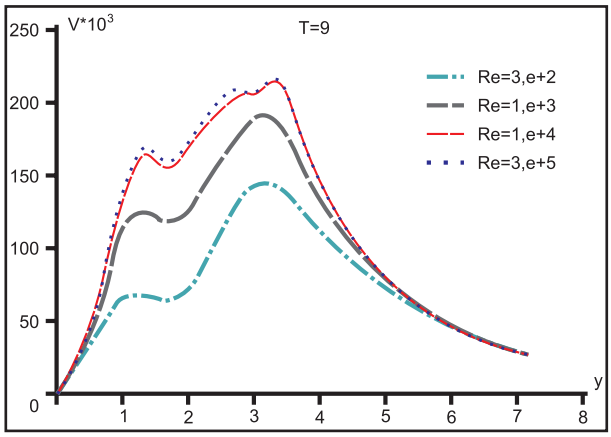

Рис. 3.

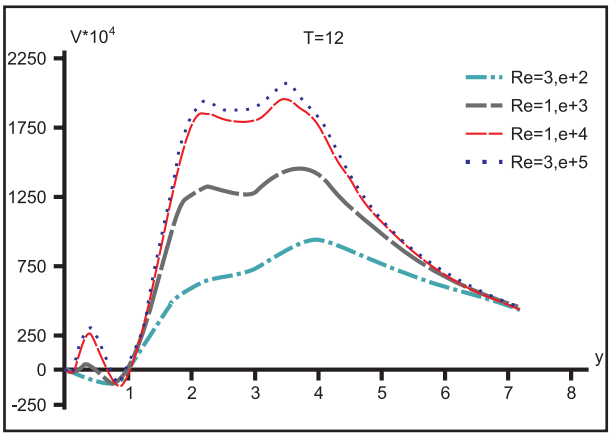

Рис. 4.

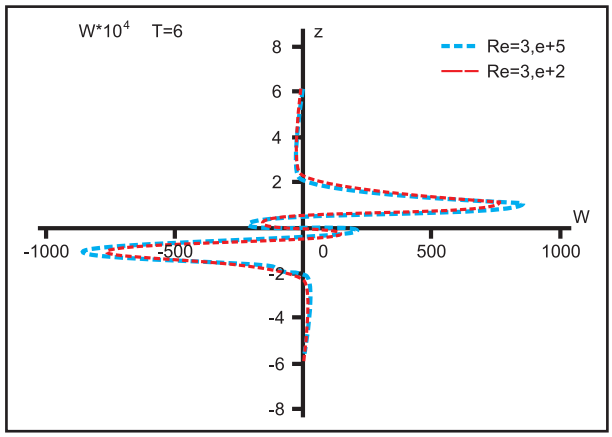

Рис. 5.

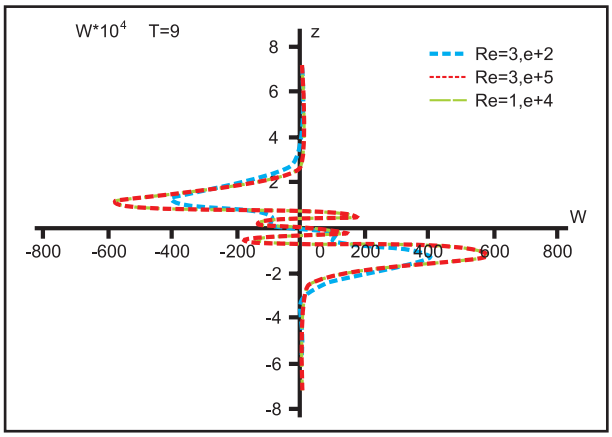

Рис. 6.

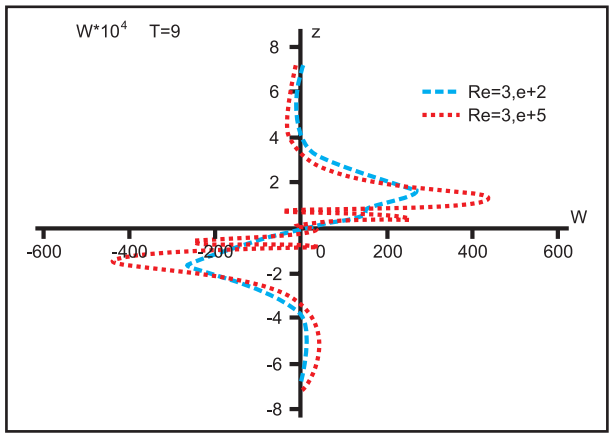

Рис. 7.

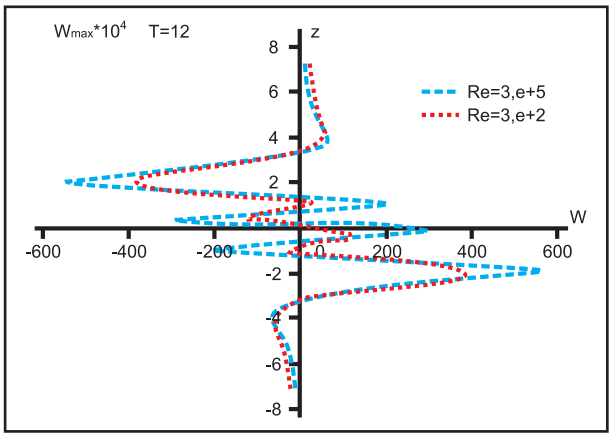

Рис. 8.

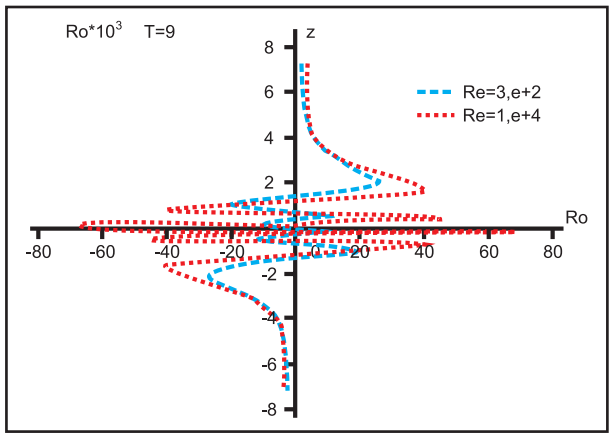

Рис. 9.

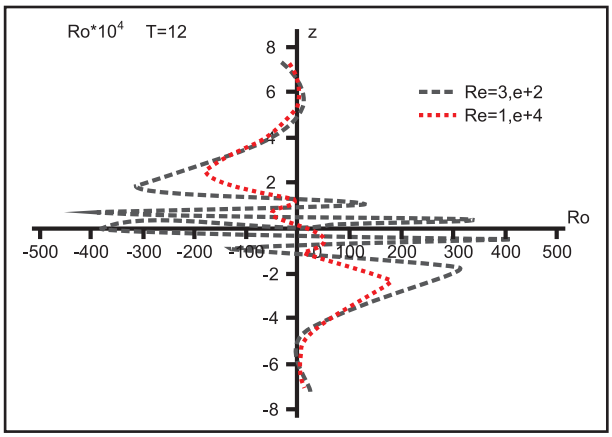

Рис. 10.

океанологии на основе компактных схем третьего порядка. М.: ВЦ АН СССР, 1991.
5. Костин В.И. Применение компактных аппроксимаций третьего порядка к решению некоторых задач неоднородной несжимаемой жидкости // Тр. XV конф. молод. ученых МФТИ. М. 1990. Ч.1. Деп. В ВИНИТИ №6174-В90. С.135 – 148.
6. Копысов А.Н., Костин В.И. Излучение звука турбулентной струей в спутном потоке при малых числах Маха // Тр. XV конф. молод. ученых МФТИ. М. 1990. Ч.1. Деп. В ВИНИТИ №6174-В90. С.120 – 134.
7. Копысов А.Н., Костин В.И. Численное моделирование излучения звука турбулентным течением в стратифицированной среде. М.: ВЦ АН СССР, 1991.
8. Рыков В.В. Численное моделирование пространственных течений несжимаемой вязкой жидкости. М.: ВЦ АН СССР, 1983.
9. Толстых А.И. Компактные разностные схемы и их применение в задачах аэрогидродинамики. М.: Наука, 1990.
10. A.I. Tolstykh. Development of arbitrary-order multioperators-based schemes for parallel calculations. 1: Higher-than-fifth-order approximations to convection terms // J. Comput. Phys. 2007. V.225. P.2333-2353.
11. Липавский М.В., Толстых А.И., Чигерёв Е.Н. О схеме с мультипликаторными аппроксимациями 9-го порядка для параллельных вычислений и ее применении в задачах прямого численного моделирования // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2006. Т.46. №8. С.1433-1452.

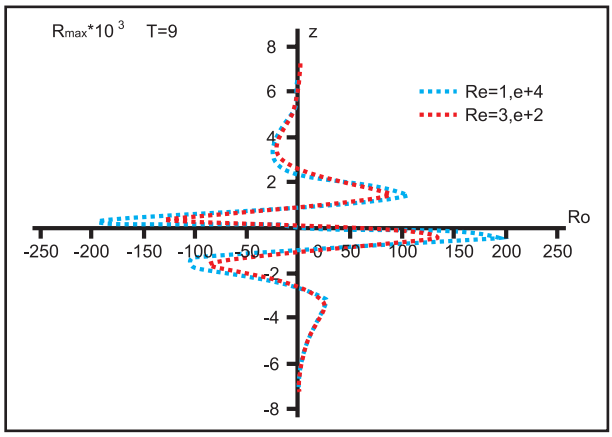

Рис. 11.

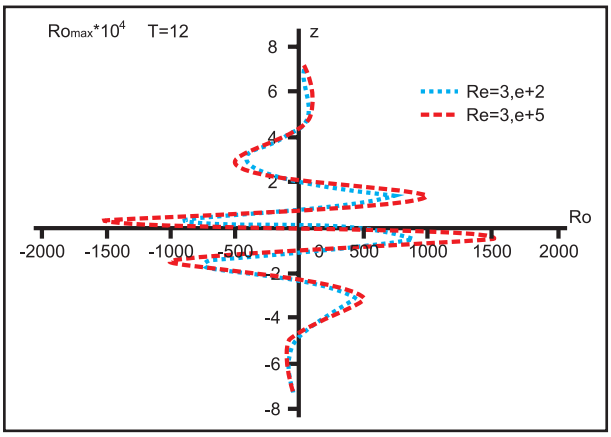

Рис. 12.

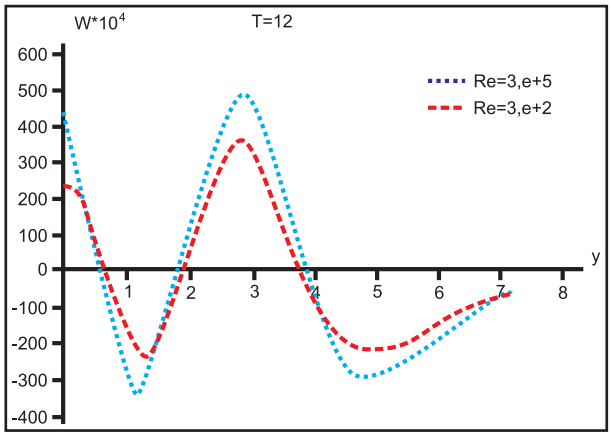

Рис. 13.

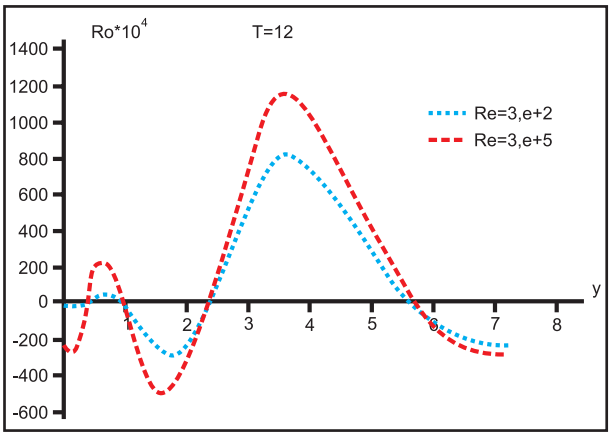

Рис. 14.

12 .Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1964. ч. 1.
13. Кочин Н.Е., Кобель И.А, Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. М.: Физматгиз, 1963. ч. 1 и ч. 2.
14. Океанология. Физика океана. т.1. Гидрофизика океана/ Под ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1978.
15. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978

УЧРЕЖДЕНИЕ: Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

ТЕМА: Мониторинг прочности металлоконструкций запорных гидравлических конструкций СГТС

АВТОРЫ: Е.А. ЗАЙЦЕВ, кандидат технических наук, заведующий лабораторией сопротивления материалов кафедры «Теоретическая механика»; И.А. МЕЩИХИН, аспирант

Задача мониторинга прочности – это периодическая регистрация состояния металлоконструкций и сопоставление результатов измерения с их предельными значениями. Эти предельные значения, как правило, уже известны для каждого сооружения и проранжированы по уровням безопасной работы конструкции. Из сопоставления критериальных оценок и результатов измерений документально прописан порядок действия при наступлении тех или иных коллизий.

Основной характеристикой таких объектов является количественная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности конструкции, изменяющихся в процессе эксплуатации как в результате естественных деструктивных процессов, так и при воздействии не предусмотренных правилами эксплуатации значимых силовых факторов. Подобные явления сопровождаются утратой части прочностного ресурса, и по оставшемуся его запасу определяется текущая надежность работы сооружения. Обычно это – выход компонентов НДС в экстремальных зонах конструкции за диапазон упругости материала и, как следствие,

появление недопустимых прогибов конструкции, ухудшающих эксплуатационные характеристики или появление усталостных или коррозионно-усталостных трещин, ослабляющих несущую способность или жесткость конструкции. Поэтому оценка разброса значений НДС металлоконструкции в ее экстремальных зонах является основным предметом прочностного мониторинга.

Особенно важно знать остаточный прочностной ресурс конструкции к концу ее гарантийного срока эксплуатации.

Заградительные конструкции гидросооружений проектируются на длительные сроки эксплуатации, дороги в проектировании, изготовлении и монтаже, и потому выработка имеющегося прочностного ресурса при обеспечении надежной работы конструкции экономически целесообразна.

Гарантийный срок работы таких сооружений исчисляется десятилетиями, а потому текущее состояние прочностного ресурса в процессе эксплуатации должно периодически уточняться.

Период дальнейшей эксплуатации может быть укорочен в силу прошедших непредусмотренных деструктивных процессов, а может быть и увеличен по результатам правильно организованных планово-предупредительных ремонтов. И возникает момент, когда необходимо принимать решение о замене существующей конструкции на новую. Естественно, к моменту принятия решения работоспособность конструкции обеспечивается на все время технологического цикла ее изготовления и замены.

Стоит отметить, что получение достоверной информации о НДС объемных балочно-пластинчатых конструкций всегда связано с определенными трудностями. И на каждом этапе развития науки и техники использовались конкретные, оптимальные на определенный момент времени, методы решения. Как правило, это теоретические или экспериментально-теоретические расчетные методы механики твердого тела.

На современном этапе применение на практике мощных вычислительных машин и мирового развитого программного обеспечения существенно облегчило задачу определения текущего значения НДС подобных конструкций. Создание цифрового прототипа, то есть расчетной модели конструкции, основано на использовании вариантов метода конечного элемента (МКЭ).

В результате конечно-элементной дискретизации конструкции формируются варианты цифрового прототипа, и уже на них проверяются все случаи нагружения реальной конструкции. Возможность исследования всевозможных сочетаний нагрузок на цифровом прототипе с сопоставлением результатов вычислений с реально замеренными параметрами отклика конструкции на эти воздействия создают условия получения достоверной информации о ее НДС.

Таким образом, проведение расчетов на цифровых прототипах по определению НДС конструкции в трехмерной по координатам постановке по всем технологическим и эксплуатационным этапам их нагружения (их непосредственной работы) с применением линейных, нелинейных и динамических постановок в настоящее время полностью решает задачу определения прочностного ресурса таких устройств.

Естественно, остается необходимость в учете механических свойств материалов и их долговременных характеристик, получаемых экспериментальными и экспериментально-теоретическими методами. Но и здесь наличие наработанных мировой практикой критериев и методов определения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) с уже известными ориентировочными значениями на подобных материалах повышеют достоверность результатов при работе с цифровыми прототипами.

Современная мировая техническая оснащенность испытательного оборудования по определению свойств материалов (в рамках проводимой авторами работы – конструкционной стали М16С, ГОСТ 6713-53) на образцах и реальных фрагментах конструкций обеспечивает получение точных значений упругих, пластических и усталостных характеристик.

Результатом исследований поведения конструкции при учете всех действующих нагрузок и условий эксплуатации является формирование таблиц критических значений ее НДС. Создание таких таблиц по регламентации остаточного прочностного ресурса конструкции затвора, подобного затвору головы шлюза № 7 канала имени Москвы, начинается с анализа нагружения цифрового прототипа в упругой постановке. (Из-за недостатка финансирования намеченные официальные договора МГАВТ с ФГУП «Канал имени Москвы» заключены не были, поэтому дальнейшая работа проводилась в рамках научно-исследовательской деятельности кафедры ИКТ).

На рис. 1 и 2 представлены внешний вид заградительного щита затвора и конструкция устройства опирания опорных стоек затвора.

Рис. 1. Конструкция несущей части затвора

Рис. 2. Конструкция устройства опирания опорных стоек затвора

Затвор спроектирован в виде балочно-коробчатой конструкции заградительного щита, опирающейся на король головы шлюза двумя опорными стойками. Коробчатое сечение основной несущей балки конструкции обеспечивает ее высокую жесткость, а расположение опорных стоек подобрано таким образом, чтобы исключить их отклонение от перпендикулярности к несущей горизонтальной балке в процессе нагружения конструкции перепадом гидростатического давления. Для устранения изгибающих моментов в опорных стойках в плоскости этой П-образной рамы в опорных узлах предусмотрена возможность углового отклонения опорных стоек. Здесь установлены сферические плавающие подшипники с возможностью перемещений вдоль их осей.

Таким образом, изначально в плоскости П-образной балки исключалась возможность изгиба опорных стоек. В перпендикулярной плоскости к П-образной раме изгиб опорных стоек не разгружался ввиду намеренного расположения равнодействующей силы гидростатического перепада ниже этой плоскости.

По результатам анализа чертежей затвора шлюза № 7, полученных на канале имени Москвы, и внешнего осмотра конструкции сформулирована расчетная схема цифрового прототипа для основных видов нагружения, в качестве которых выбрано:

1. Воздействие на конструкцию гидростатического перепада при сдерживании 6-метрового перепада уровней воды.

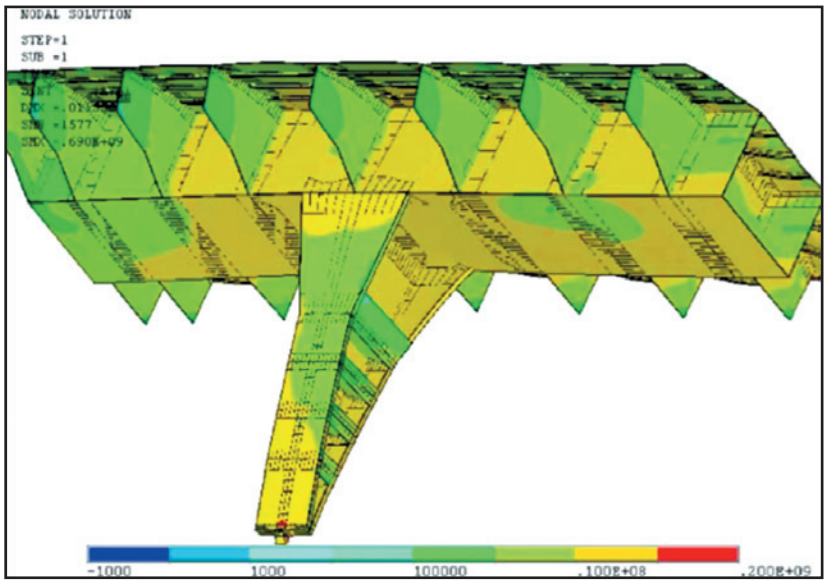

Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений от действия гидростатического перепада давления

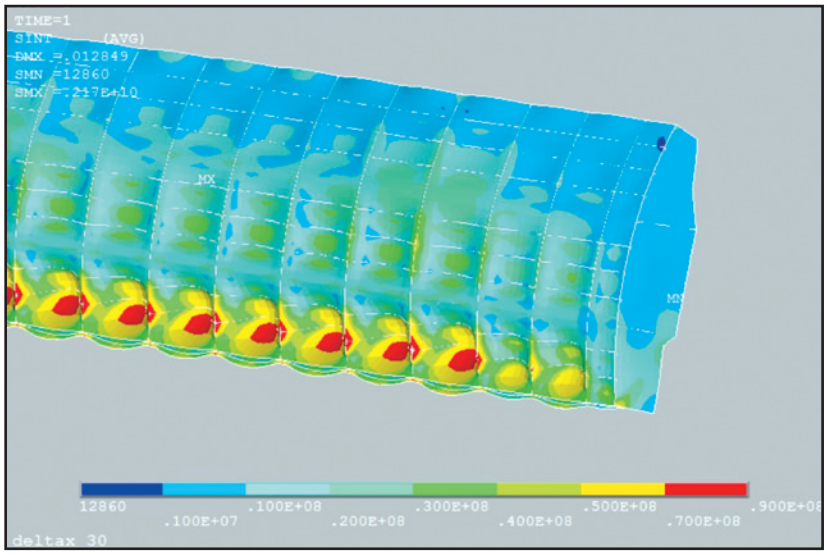

Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений от действия гидростатического перепада давления (со стороны напора)

2. Перекашивание щита при эксплуатационном воздействии, возникающее в крайних значениях допуска на рассогласование в работе двух независимых подъемных цепей механизма подъема затвора.

В постановке задачи в качестве критериальной оценки НДС цифрового прототипа использовалась интенсивность напряжений. Расчеты проводились в программах «ANSYS» и «ANSYS CIVIL».

Распределение интенсивности напряжений на затворе от действия гидростатического перепада давления показано на рис. 3 и 4.

Анализ полученного НДС выявил, что максимальные значения интенсивности напряжений находятся на напорной стороне щита в его заглубленной части и на нижних поверхностях опорных стоек. Эти значения составляют соответственно 71 и 63 МПа соответственно. Прогиб конструкции на середине верхней кромки щита – 7,27 мм.

В процессе эксплуатации в технологическом цикле подъема щита возможно его перекашивание по вертикали до 30 мм, что создает дополнительное НДС. Поэтому в следующем расчетном случае проводилась оценка НДС затвора с учетом эксплуатационной нагрузки перекоса щита, возникающей и действующей при его подъеме.

Максимальные значения интенсивности напряжений находятся в двух зонах – в нижней части щита затвора и области подкоса опорного сектора (рис. 3 и 4). Обозначим их как зоны 1 и 2 соответственно.

Дальнейший анализ напряжений будет проведен относительно этих областей. Напряжения в зонах 1 и 2 составляют 80 и 150 МПа. Величина вектора перемещений на середине верхней кромки щита (зона 3) равна 19 мм.

Таким образом, благодаря использованию цифрового прототипа появилась возможность проведения анализа НДС конструкции при действии основной (гидростатическое давление) и технологической нагрузки (перекос щита при подъеме). А это означает, что по двум расчетным случаям нагружения в конструкции затвора известны в каждой его точке и тензор напряжений, и тензор деформаций, и вектор перемещений.

Теперь для организации процесса мониторинга остается выбрать в наиболее удобных местах те компоненты НДС, которые более доступны для практических измерений.

Измерение компонентов НДС на нагруженной конструкции обеспечивается расстановкой отдельных датчиков напряжений или деформаций или установкой специально сконструированных измерительных ячеек, укомплектованных специальным набором датчиков. Получаемые с них сигналы программно сопоставляются с ранжированными по уровням надежности компонентами НДС, хранящимися в базе данных прочностного мониторинга конструкции.

Преимущество использования линейной модели при прочностном анализе заключается в возможности использования свойств аддитивности и ассоциативности. Как следствие, напряженно деформированное состояние затвора – суперпозиция от действия совокупности эксплуатационных факторов, причем каждый из них влияет на общую картину как линейный оператор.

Указанные предпосылки формируют основания для представления данных о предельных состояниях не только в виде таблиц значений, но и в виде многомерных эпюр состояний, построенных по результатам серии расчетов НДС конструкции. Используя данные эпюры возможно определить текущее состояние затвора по измеренным значениям эксплуатационных параметров. Применение рассчитанных для каждого сооружения подобных эпюр позволит более полно использо-

вать остаточный ресурс сооружений на водном транспорте, но это уже предмет дальнейших исследований.

В зависимости от поставленной задачи мониторинга в организации контроля прочности конструкции могут быть и упрощенные варианты с использованием измерений компонентов вектора перемещений в заданных точках с последующим сравнением с соответствующей базой данных, хранящейся на электронных или бумажных носителях.

Базовая таблица 1, на основе которой служба мониторинга может формировать ранжированные по надежности контрольные значения под планируемую систему измерений, представлена далее.

Вопрос экспериментального подтверждения результатов исследований на цифровом прототипе за неимением возможности непосредственных измерений хотя бы прогибов на запорном щите затвора рассматривался при визуальном осмотре состояния затвора под напором на короле шлюза. Были сопоставлены расчетные значения перемещения опорных стоек в зоне устройств опирания: расчетные значения сдвижки опорных точек равнялись 0,23 мм, а реальное положение опорных точек оказалось сдвинутым от середины наружу на 15 мм, что явно не соответствует результатам расчета. И при анализе причин появления такого несоответствия были выдвинуты две гипотезы:

– искривление опорных стоек в результате начинающегося процесса потери их устойчивости;

Таблица 1

Результаты измерений

Расчетный случай	Зона 1	Зона 2	Зона 3
Перепад давления	71 МПа	63 МПа	7,27 мм
Перепад давления и перекос	80 МПа	150 МПа	19 мм

Таблица 2

Значения параметров мониторинга с учетом уточнений

Расчетный случай	Зона 1, интенсивность напряжений	Зона 2, интенсивность напряжений	Зона 3, значения полных векторов перемещений	Толщина в зоне 4
Перепад давления	71 МПа	63 МПа	7,27 мм	8 мм
Технологический перекос при подъеме	80 МПа	150 МПа	19 мм	9,5 мм
Перепад давления и подвижка опорных точек на 15 мм	83 МПа	178 МПа	7,34 мм	10,65 мм

– подвижка опорных точек в результате повышенного прогиба центральной части щита затвора.

Соответственно, расчет затвора на устойчивость должен быть проведен в линейной постановке с определением собственных форм потери устойчивости. Здесь запас на устойчивость надо рассматривать как прогноз потери устойчивости на идеальной линейной упругой конструкции.

Так как отклонение опорных стоек теоретически снижает запас по устойчивости, то выбраны крайние расчетные случаи: при отсутствии подвижки опорных точек опорных стоек и при их подвижке в 15 мм.

Как и следовало ожидать, запас по устойчивости оказался минимальным при максимальном отклонении опорных точек и для наиболее опасной первой собственной формы равен 1,34. Следовательно, устойчивость конструкции обеспечена и выявлены местоположения зон на заградительном щите затвора, ответственные за потерю устойчивости всей конструкции затвора.

Также расчетным путем найдены критические значения толщин несущих элементов конструкции в ответственных зонах, при которых возможна потеря устойчивости: при толщине металла в указанной зоне меньшей, чем 10,65 мм, устойчивость конструкции не обеспечивается.

В таблице 2 представлены значения параметров мониторинга с учетом уточнений.

В экстремальной зоне 2 в тензоре уже фиксируется компонента пластической деформации ε=0,009. Пластические деформации невелики, максимальное значение перекоса щита при его подъеме – явление редкое, и при оценке прочности требует статистического учета. Но оно реально существует, и при мониторинге ему следует уделять пристальное внимание.

При анализе причин, приводящих к повышенному прогибу средней части заградительного щита затвора, можно сформулировать еще один расчетный случай: циклическое динамическое воздействие ударной силы, порож-

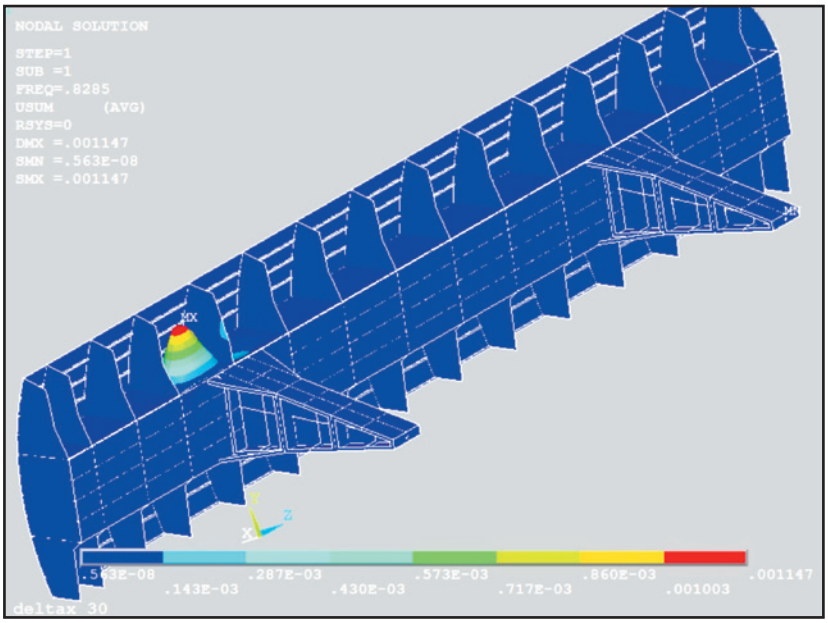

Рис. 5. Первая (наиболее опасная) форма потери устойчивости конструкции затвора

даемой периодическим мгновенным открыванием и закрыванием брусового уплотнения.

В качестве элемента уплотнения в затворе был использован деревянный брус на всю ширину затвора. При несанкционированном открывании уплотнения происходит импульсный удар по нижней части заградительного щита в соответствии с принципом Бриджмена. Далее следует запирание уплотнения и период покоя, при котором в соответствии с законом Бернулли происходит переформирование потоков воды в пазах и неплотностях прилегания самого уплотнения к бетонному основанию для нового цикла удара. При каждом ударе бруса при раскрытии уплотнения в затворе, находящимся под нагрузкой, происходит импульсное перемещение конструкции, четко регистрируемое во внутренней полости заградительного щита.

Данный процесс автоколебаний сопровождался воздействием значимой ударной силы на заградительный щит затвора. О количественной оценке можно только делать предположения, и проводить грубые предварительные расчеты. Предварительная оценка возможной величины этой силы, полученная исходя из эффективной площади бруса и перепада гидростатического давления, составляет 18 т, что является значимым силовым воздействием на конструкцию. Однако это уже динамическая задача, требующая проведения теоретических и экспериментальных исследований, не входящих в рамки настоящей работы. Проведение очередного ремонта или замены уплотнительного бруса позволит устранить причины автоколебаний. Но поскольку подобный процесс возможен, требуется постоянный контроль.

ВЫВОДЫ

1. По подвижкам точек опоры опорных стоек можно предположить появление в конструкции затвора пластических деформаций, увеличивающих прогиб заградительного щита.

2. НДС и прочность затвора по основным видам нагружения достаточно точно определяются расчетными методами с использованием программ типа «ANSYS».

3. В результате подобных исследований формируются параметры прочностного мониторинга конструкции как с использованием датчиков и специальных измерительных ячеек, так и с применением дистанционных приборов определения перемещений в заданных зонах конструкции.

4. В базу данных мониторинга рассмотренного затвора включены 3 зоны по контролю значений компонентов НДС, 2 зоны измерения толщин элементов конструкции и зоны подвижек опорных точек. Измерения могут производиться в автоматическом и ручном режимах.

5. Оценка состояния конструкции определяется по комплексному критерию оценки надежности работы конструкции, вычисляемому по данным прочностного мониторинга затвора и мониторингу других компонентов шлюза.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. О.Зенкевич. Метод конечных элементов/ Мир//М.: 1975.
2. Методические указания «Определение технического состояния металлоконструкций ворот и затворов СГТС» МУ 060.025-2001 Министерство транспорта РФ. Государственная служба речного флота. Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций. Утверждено зам. министра РФ Смирновым Н.Г. 28.12.2001. Москва 2002 г.
3. Инструкция по наблюдениям и исследованиям на судоходных гидротехнических сооружений. – М.: Транспорт, 1982.
4. Кошин И.И, Колесов А.И., Максимов В.В. Металлические конструкции в гидротехнике. Изд. Ассоциации строительных вузов//М.: 2002

УЧРЕЖДЕНИЕ: Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

ТЕМА: Комплексное использование спутниковых и геоинформационных технологий на судах смешанного река–море плавания

АВТОРЫ: В.А. КАТЕНИН, профессор кафедры «Судовождение», ученый секретарь ГНИНГИ МО РФ, доктор военных наук; А.В. БОЙКОВ, декан факультета «Судовождение и эксплуатация флота», заведующий кафедрой «Судовождение», кандидат технических наук, доцент

Навигационная безопасность плавания во многом зависит от своевременности и обоснованности управленческих решений, принимаемых капитаном или его вахтенным помощником во время несения ходовой вахты, основанных на оперативном получении полной и достоверной информации. Однако недостаток или избыток такой информации в экстремальных ситуациях приводит к неправильным действиям с негативными последствиями.

При недостатке информации складывается ситуация неопределенности, не способствующая принятию верного решения.

В случае избытка информации судоводителю становится весьма затруднительно выделить в ней главное, отсеять несущественное, выявить основные взаимосвязи и принять адекватные меры.

Таким образом, возникают противоречия между количеством и качеством получаемых данных, способах их обработки, отображения, хранения и использования в интересах безопасности судовождения. Все это вызывает необходимость проведения специальных исследований, которые количественно и качественно помогут найти оптимальный выход.

Ответить на поставленный вопрос, по мнению авторов статьи, возможно за счет комплексного использования новых технологий в судовождении: спутниковых систем различного назначения и средств отображения разнородной информации на основе геоинформационных систем (ГИС), под которыми понимается совокупность компьютерного оборудования, программного обеспечения, географических данных и про-

извольного проектирования пользователем хода работ для накопления, хранения, видоизменения, обработки, анализа и визуализации всех форм информации [1].

Как известно [2], основой любой ГИС является цифровая карта.

Система позволяет создавать карты в разных масштабах и проекциях с различной окраской, определять пространственные связи между объектами карты, то есть получать любую нужную географическую картину, удовлетворяющую требованиям потребителя. Таким образом, главное назначение ГИС – оперативное представление пользователю достоверной и обработанной пространственно-распределенной информации, необходимой для решения управленческих задач, что делает ее незаменимым аналитическим инструментом в повседневных и особенно в экстремальных условиях.

Успешность функционирования ГИС преимущественно обусловлена соблюдением следующих основных требований, предъявляемых к ним. Система должна быть:

– полной, то есть охватывать все стороны информационного, программного и технологического обеспечения, которые встречаются в процессе эксплуатации системы;

– комплексной, то есть иметь возможность совместного анализа больших групп параметров в их взаимосвязи;

– открытой, то есть обеспечивать легкость модификации и перенастройки с целью поддержания ее на должном уровне, что необходимо как для обеспечения эволюционности, так и для решения разнообразных задач;

– защищенной, то есть обеспечивать защиту информации, предназначенной для различных уровней управления.

К дополнительным требованиям ГИС следует отнести:

– создание и ведение баз пространственно-распределенных данных;

– создание и редактирование цифровых карт в различных проекциях и масштабах;

– отображение различных данных в виде карт, графиков, диаграмм и т.п.;

– анализ картированных данных;

– измерение геометрических характеристик природных объектов, расстояний от географических точек до районов с теми или иными условиями и т. д.;

– изменение масштабов отображения, форм и вида представления графической и картированной информации;

– привязка информации из баз данных (БД) к географическим объектам на цифровых картах;

– интерполяция и построение векторных и скалярных полей по информации из БД;

– выполнение запросов на многообразные выборки из БД; на отображение и пространственный анализ картированных данных (по параметрам, периодам времени, районам и т. д.);

– документирование информационной продукции;

– применение приложений для выполнения специальных видов обработки, хранения информации и др.

Одной из сложнейших проблем в ГИС-технологии является оперативный сбор и хранение исходных данных, съемка которых представляет собой трудоемкий и дорогостоящий процесс. В настоящее время наибольшее распространение в качестве основы для создания цифровых карт получили традиционные морские и речные бумажные навигационные карты. Однако при их отсутствии или при необходимости получить оперативную информацию большого пространственного охвата представляется целесообразным использовать дистанционные средства. Особая роль здесь отводится спутниковой информации в ГИС, где результаты дистанционного зондирования поверхности Земли (океана) из космоса являются регулярно обновляемыми источниками данных, необходимых для формирования информационных слоев электронных карт в широком спектре масштабов (от 1:10000 до 1:10000000). Информация же от дистанционных средств зондирования позволяет не только оперативно оценивать, но главным образом производить обновление и корректуру использующихся графических слоев с точной привязкой объектов на них к географической системе координат.

С учетом изложенного, для формирования графических слоев может быть полезной комплексная информация от следующих спутниковых систем:

– навигационных (ГЛОНАСС, GPS, Gallileo, ГЛОНАСС+GPS+Gallileo);

– освещения обстановки;

– океанографической;

– метеорологической;

– топогеодезической и др.

При этом для осуществления связи между судами и командованием различного уровня предусматривается использование спутников-ретрансляторов.

Интеграция комплексной спутниковой информации и ГИС открывает принципиально новые возможности в обеспечении навигационной безопасности судовождения. Новая технология обладает следующими достоинствами, которые выводят ее в лидеры за счет:

– комплексности информации;

– оперативности ее получения и представления в компактном виде;

– наглядности представления;

– возможности анализа совокупной разнородной информации и выработки обоснованных управленческих решений.

Доказать ее преимущества перед существующими подходами обеспечения навигационной безопасности плавания, основанными на использовании только электронной карты и спутниковой навигационной системы, представляется возможным, используя предлагаемый в статье новый метод сравнительной оценки эффективности. Его суть состоит в следующем.

Классифицируем типовые условия плавания и кратко дадим их описания. В соответствии с мировой практикой районы плавания судов принято разделять на [3]:

– океанские, где плавание осуществляется за пределами континентального шельфа и/или на расстоянии более 50 морских миль от суши или других препятствий;

– прибрежные, где плавание осуществляется в пределах 50 морских миль от берега или в пределах внешней границы прибрежных банок или других опасностей, или в местах, где плавание подвергается ограничениям;

– подходы к гаваням и плавание в них, где плавание осуществляется в водах, находящихся между сушей и зоной прибрежного плавания (данные районы в практике судовождения определяются отдельно для каждого водного пути);

– внутренние водные пути (ВВП), где плавание осуществляется в ограниченных районах, сходных с плаванием в гаванях или на подходах к ним.

Далее целесообразно выделить только 3 зоны: океанскую, прибрежную и стесненного плавания.

Для сравнительной оценки эффективности предложенной новой технологии сопоставим ее с действующими подходами:

– без использования электронных карт;

– с применением (для отображения заданного маршрута движения и отображения необходимой информации для обеспечения безопасности плавания) электронных картографических навигационно-информационных систем (ЭКНИС).

В качестве критерия для сравнения систем примем вероятность получения достоверной информации для принятия управленческого решения $P_{ДОСТ}$ – мультипликативный показатель вида [4]:

$$P_{НБП} = \prod_{i=1}^{n} P_i, \qquad (1)$$

где P_i – частные показатели (i=1,5);

P_1 – показатель точности плавания судна в любой момент времени;

P_2 – показатель оперативности информации (РОП) – вероятность получения необходимой информации в заданный момент или в реальном времени;

P_3 – показатель обоснованности информации (РОБ) – вероятность получения информации в зависимости от ситуации, в которой находится судно. Он рассчитывается с применением математического моделирования;

Р4 – показатель влияния внешней среды (РГМО) – вероятность получения в реальном времени гидрометеорологической информации, влияющей на безопасность плавания судна;

Р5 – показатель влияния человеческого фактора на безопасность судовождения (РЧФ) – вероятность принятия правильных управленческих решений с учетом человеческих качеств и профессионального опыта.

Основным средством определения места судна в настоящее время являются спутниковые навигационные системы второго поколения: GPS (США) и СНС ГЛОНАСС (Россия) и их функциональные дополнения.

Частный показатель P_1 рассчитывается как вероятность попадания судна в круг заданного радиуса или в полосу заданной ширины соответственно [5]:

$$P_к = 1 - \exp(-r/M)^2, \qquad (2)$$

$$P_п = \Phi\left(\frac{Ш_п}{M\sqrt{2}}\right), \qquad (3)$$

где r – заданный радиус;

M – СКП определения места;

$$\Phi = \frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}}dt$$ – функция Лапласа.

Для вычисления других частных показателей эффективности могут быть использованы аналитические зависимости или вероятностные оценки, которые находятся экспертным путем [6, 7].

Сравнительный анализ эффективности предлагаемого метода проведем для трех вариантов (рис. 1-3):

– вариант 1 – для существующего оборудования ходового мостика с приемниками СНС, но без электронных карт;

– вариант 2 – для ходового мостика с приемниками СНС и электронными картами;

– вариант 3 – для ходового мостика с приемниками различных спутниковых систем и ГИС-технологий.

Результаты расчетов по формуле (1) приведены соответственно в таблицах 1-3.

На основе конечных результатов $P_{дост}$, взятых из таблиц, построены графики для исследуемых вариантов и состава ходовой вахты.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов трех вариантов в условиях приведенного примера позволяет сделать следующие выводы:

1. Общим в описанных случаях является то, что вероятность получения достоверной информации повышается для всех членов ходовой вахты при переходе от океанской зоны плавания к плаванию судна в стесненных условиях и на ВВП.

2. Использование только СНС+ЭКНИС незначительно повышает вероятность получения достоверной информации $P_{дост}$. Резкое увеличение уровня $P_{дост}$ обеспечивает комплексное использование разнородной спутниковой информации и ГИС-технологий.

3. В рамках первого варианта (при отсутствии электронных средств картографии и отображения внешней обстановки) наблюдается преимущество капитана над другими членами ходовой вахты, особенно в зоне стесненного плавания. Это преимущество составляет:

– от 1,15 раза до 1,21 раза – над старшим помощником соответственно в океанской зоне плавания и при плавании в стесненных условиях;

– от 1,41 до 1,62 раза – над вторым помощником капитана;

– от 1,73 до 1,92 раза – над третьим помощником.

Таблица 1

Существующее оборудование ходового мостика с приемниками СНС, но без электронных карт

Вахта	Зоны плавания		
	Океанская	Прибрежная	Стесненные условия и ВВП
Капитан	$P_{опер}$=0,75; $P_{чф}$ =0,97; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,7; $P_{об}$ =0,75; **$P_{дост}$=0,38**	$P_{опер}$= 0,8; $P_{чф}$ =0,95; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,75; $P_{об}$ = 0,75; **$P_{нбп}$=0,43**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ = 0,9; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,85; $P_{об}$ = 0,75; **$P_{нбп}$=0,52**
Старший помощник	$P_{опер}$= 0,75; $P_{чф}$ =0,9 $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,7; $P_{об}$ =0,7; **$P_{дост}$=0,33**	$P_{опер}$= 0,8; $P_{чф}$ =0,85; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,75; $P_{об}$ =0,7; **$P_{дост}$=0,36**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ =0,8; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,85; $P_{об}$ =0,7; **$P_{дост}$=0,43**
Второй помощник	$P_{опер}$= 0,75; $P_{чф}$ =0,8; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,7; $P_{об}$ =0,65; **$P_{дост}$=0,27**	$P_{опер}$= 0,8; $P_{чф}$ =0,75; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,75; $P_{об}$ =0,6; **$P_{дост}$=0,27**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ =0,7; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,85; $P_{об}$ =0,6; **$P_{дост}$=0,32**
Третий помощник	$P_{опер}$= 0,75; $P_{чф}$ =0,7; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,7; $P_{об}$ =0,6; **$P_{дост}$=0,22**	$P_{опер}$=0,8; $P_{чф}$ =0,7; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,75; $P_{об}$ =0,55; **$P_{дост}$=0,23**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ =0,65; $P_т$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,85; $P_{об}$ =0,55; **$P_{дост}$=0,27**

Таблица 2

Существующее оборудование ходового мостика с приемниками СНС и с ЭКНИС

Вахта	Зоны плавания		
	Океанская	Прибрежная	Стесненные условия и ВВП
Капитан	$P_{опер}$=0,75; $P_{чф}$ =0,97; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,7; $P_{об}$ =0,75; **$P_{дост}$=0,35**	$P_{опер}$= 0,85; $P_{чф}$ =0,95; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,75; $P_{об}$ = 0,82; **$P_{нбп}$=0,50**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ = 0,9; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,85; $P_{об}$ = 0,85; **$P_{нбп}$=0,58**
Старший помощник	$P_{опер}$= 0,75; $P_{чф}$ =0,9 $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,7; $P_{об}$ =0,75; **$P_{дост}$=0,35**	$P_{опер}$= 0,85; $P_{чф}$ =0,85; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,75; $P_{об}$ =0,77; **$P_{дост}$=0,42**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ =0,8; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,85; $P_{об}$ =0,82; **$P_{дост}$=0,50**
Второй помощник	$P_{опер}$= 0,75; $P_{чф}$ =0,8; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,7; $P_{об}$ =0,7; **$P_{дост}$=0,29**	$P_{опер}$= 0,85; $P_{чф}$ =0,75; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,75; $P_{об}$ =0,72; **$P_{дост}$=0,34**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ =0,7; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,85; $P_{об}$ =0,75; **$P_{дост}$=0,40**
Третий помощник	$P_{опер}$= 0,75; $P_{чф}$ =0,7; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,7; $P_{об}$ =0,65; **$P_{дост}$=0,24**	$P_{опер}$=0,85; $P_{чф}$ =0,7; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,75; $P_{об}$ =0,67; **$P_{дост}$=0,30**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ =0,65; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,85; $P_{об}$ =0,70; **$P_{дост}$=0,35**

Таблица 3

Ходовой мостик с приемниками различных спутниковых систем и ГИС-технологиями

Вахта	Зоны плавания		
	Океанская	Прибрежная	Стесненные условия и ВВП
Капитан	$P_{опер}$=0,85; $P_{чф}$ =0,97; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,9; $P_{об}$ =0,9; **$P_{дост}$=0,67**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ =0,95; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,75; $P_{об}$ = 0,92; **$P_{дост}$=0,75**	$P_{опер}$= 0,95; $P_{чф}$ = 0,9; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,97; $P_{об}$ = 0,95; **$P_{дост}$=0,79**
Старший помощник	$P_{опер}$= 0,85; $P_{чф}$ =0,9 $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,9; $P_{об}$ =0,9; **$P_{дост}$=0,62**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ =0,85; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,95; $P_{об}$ =0,92; **$P_{дост}$=0,67**	$P_{опер}$= 0,95; $P_{чф}$ =0,8; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,97; $P_{об}$ =0,95; **$P_{дост}$=0,70**
Второй помощник	$P_{опер}$= 0,85; $P_{чф}$ =0,8; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,9; $P_{об}$ =0,9; **$P_{дост}$=0,55**	$P_{опер}$= 0,9; $P_{чф}$ =0,75; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,95; $P_{об}$ =0,92; **$P_{дост}$=0,59**	$P_{опер}$= 0,95; $P_{чф}$ =0,7; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,97; $P_{об}$ =0,95; **$P_{дост}$=0,61**
Третий помощник	$P_{опер}$= 0,85; $P_{чф}$ =0,7; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,9; $P_{об}$ =0,9; **$P_{дост}$=0,48**	$P_{опер}$=0,9; $P_{чф}$ =0,7; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,95; $P_{об}$ =0,92; **$P_{дост}$=0,55**	$P_{опер}$= 0,95; $P_{чф}$ =0,65; $P_{т}$ = 1,0; $P_{гмо}$=0,97; $P_{об}$ =0,95; **$P_{дост}$=0,57**

4. По второму варианту (при наличии электронных средств картографии и отображения внешней обстановки) преимущество капитана над остальными членами ходовой вахты несколько снижается для тех же условий плавания и составляет:

– от 1,17 до 1,16 раза – для старшего помощника;

– от 1,41 до 1,45 раза – для второго помощника;

– от 1,71 до 1,66 раза – для третьего помощника.

При этом наибольшего эффекта внедрения электронных средств картографии и отображения внешней обстановки достигается при плавании в прибрежной зоне.

5. В рамках третьего варианта (при наличии информации от различных спутниковых систем и применения ГИС-технологий) происходит заметное снижение превосходства капитана над остальными членами ходовой вахты. При этом преимущество в 1,1 раза остается практически постоянным для всех зон плавания над старшим помощником; незначительно растет – от 1,22 до 1,3 раза – для рассматриваемых зон плавания над вторым помощником и несущественно снижается – от 1,4 до 1,38 раза – над третьим помощником для тех же условий плавания.

6. Наибольшее преимущество от комплексного использования разнородной спутниковой информации и ГИС-технологий получил третий помощник капитана в зоне прибрежного плавания, наименьшее – капитан при плавании в стесненных условиях.

7. Применение спутниковых и ГИС-технологий в некоторой степени нивелирует профессиональный опыт и знания

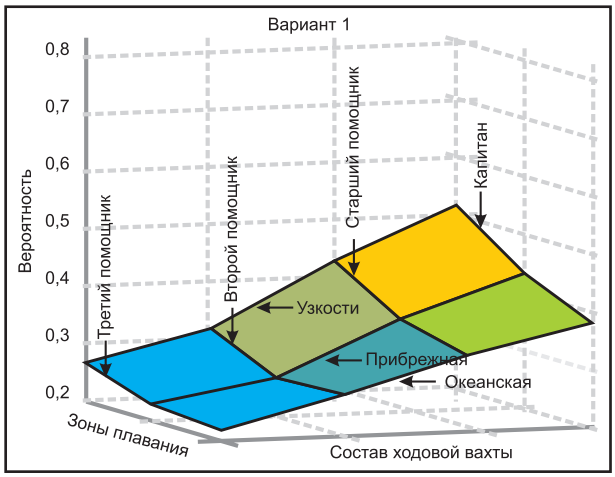

Рис. 1. Сравнительный анализ эффективности ($P_{дост}$) вахты для различных условий плавания для 1 варианта оборудования ходового мостика

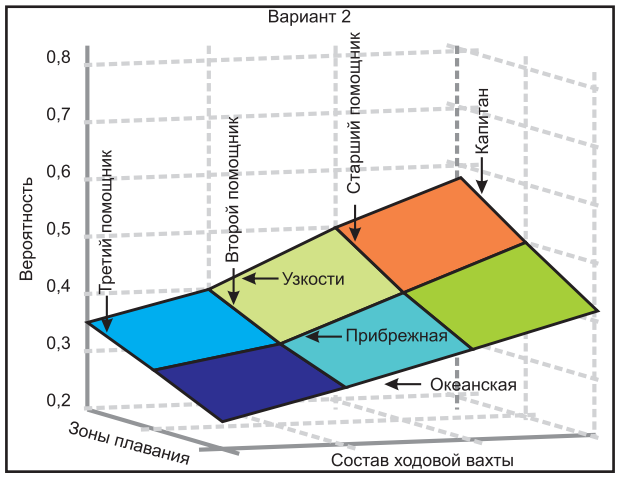

Рис. 2. Сравнительный анализ эффективности ($P_{дост}$) вахты для различных условий плавания для 2 варианта оборудования ходового мостика

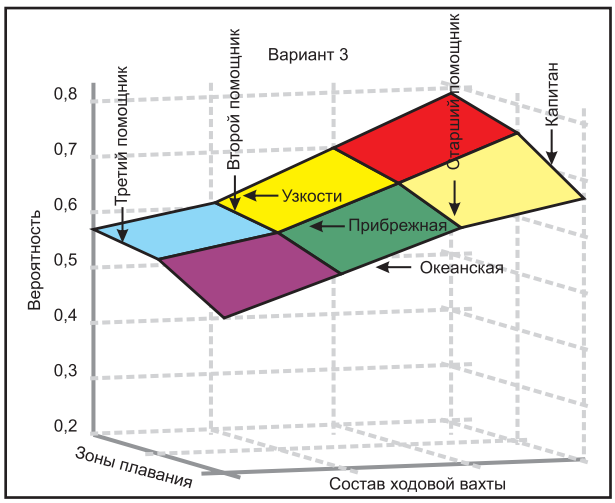

Рис. 3. Сравнительный анализ эффективности ($P_{дост}$) вахты для различных условий плавания для 3 варианта оборудования ходового мостика

членов ходовой вахты ($P_{об}$). Тем самым снижается риск «человеческого фактора» от неправильно принятого решения и создаются значительные предпосылки для автоматизации процесса судовождения.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. Тикунов В.С. Моделирование в картографии. – М.: изд-во МГУ, 1997. – 405 с.
2. Катенин В.А., Катенин А.В. Новые возможности комплексного использования спутниковых и ГИС-технологий при навигационно-гидрографическом обеспечении. Информационно-управляющие системы, №1, 2002. – С.18-23.
3. МАМС: Руководство по навигационному оборудованию (NAVGUIDE). – СПб.: ГУНиО МО РФ,2001. – 172 с.
4. Кондрашихин В.Т. Определение места судна. – М.: Транспорт, 1989.- 232 с.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. –М.: Наука, 1988. – 480 с.
6. Дж. Мартино. Технологическое прогнозирование. – М.: Прогресс, 1977. – 592 с.
7. Бешелев С.Д., Гурвиц Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 264 с.

УЧРЕЖДЕНИЕ: **Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)**

ТЕМА: **Обоснование безопасной эксплуатации портальных кранов**

АВТОРЫ: **О.В. ЛЕОНОВА, профессор, кандидат технических наук; Е.Г. ВЕРЕТЕННИКОВ, соискатель; А.С. СМИРНОВА, студентка**

В соответствии с Техническим регламентом «О безопасности машин и оборудования» [1], вступившим в силу 25 сентября 2010 года, изменились требования к технической и эксплуатационной документации и появилась необходимость в разработке нового документа по обоснованию безопасности машин и механизмов. Речь идет об аналоге европейского технического файла (Technical file) или файла истории продукции (Design Dossier), в состав которого наряду с конструкторской, эксплуатационной, технологической документацией входит оценка риска эксплуатации.

На современном этапе в России эти вопросы находят отражение в проектах Федеральных законов: № 443002-5, 442978-5, 380094-5, 454517-5, 377578-5 и национальных стандартах, разрабатываемых в целях обеспечения требований Технического регламента «О безопасности машин и оборудования».

Таблица 1

Форма рабочего листа для проведения анализа видов и последствий отказов

Код элемента (функции)	Наименование элемента (функции)	Вид (описание) отказа	Возможные причины отказа	Последствия отказа на рассматриваемом уровне	Последствия отказа на вышестоящем уровне	Последствия отказа на уровне изделия	Способы и средства обнаружения и локализации отказа	Рекомендации по предупреждению (снижению) тяжести последствий отказа	Категория тяжести последствий отказа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Однако применительно к водному транспорту подобный задел в нормативно-правовой базе до сих пор отсутствует. Поэтому в МГАВТ проводится подготовка методических материалов для количественной оценки риска эксплуатации портальных кранов (ПК), представляющих собой комплексный показатель вероятности безотказной работы всех элементов.

Анализ существующих документов и обобщение методов позволили создать наиболее адекватную для ПК модель оценки риска их безопасной эксплуатации. Она основана на вероятностном принципе и логико-вероятностных подходах с применением дерева неисправностей и физико-механических способов оценки риска. Здесь исходными данными служат статистические сведения по отказам элементов электрооборудования и приводов механизмов ПК, фактическое состояние металлоконструкции и расчетные значения, характеризующие напряженно-деформированное состояние ее элементов.

Комплексную оценку риска эксплуатации ПК предлагается проводить количественным или качественным методами, учитывая при выборе:

– цели и характер результатов анализа;

– наличие исходных данных о текущем состоянии объекта и уровне опасности;

– наличие квалифицированных исполнителей.

При этом целями проведения оценки риска эксплуатации будут являться:

– выявление причин возникновения отказов и принятие мер для снижения последствий отказа (при качественной оценке риска);

– получение исходных данных об отказах, причинах их появления для определения критичности отказов и оценки вероятности аварии (при количественной оценке риска).

Методы качественной оценки риска эксплуатации базируются на оценке соответствия условий эксплуатации ПК действующим требованиям промышленной безопасности. Так, проверяются отчеты о его эксплуатации и техническом обслуживании (журнал осмотров и ремонтов, вахтенный журнал, паспорт крана) и определяются причины отказов и последствия дальнейшего использования крана.

Наиболее рекомендуемыми являются методы «анализа видов и последствий отказов» (АВПО) [2] и «анализа видов последствий и критичности отказов» (АВПКО) [3]. Они просты в применении и позволяют представить полную информацию об исходных данных и результатах нарушений. Облегчить процедуру анализа позволяют вспомогательные бланки, такие, как, например, форма, представленная в таблице 1 [3].

Наиболее точной представляется количественная оценка риска работы ПК, когда оперируют данными по надежности элементов на стадии их эксплуатации и применяются дедуктивные методы (например, дерево неисправностей), позволяющие, в сравнении с индуктивными, получить результаты, приближенные к реальным. При дедуктивном методе (в отличие от индуктивного) ситуации, ведущие к аварии, определяются исходя из самого предполагаемого конечного результата.

Анализ существующих методов оценки риска ПК показал, что его количественная оценка предполагает использование комбинированного метода с применением разных методов анализа для различных элементов оборудования.

Эти положения лежат в основе методики количественной оценки риска портальных кранов, разработанной на кафедре ППТМиР МГАВТ, а именно:

– расчетно-экспериментальные методы для исследования напряженно-деформированного состояния участков металлоконструкции, имеющих эксплуатационные повреждения в виде усталостных трещин, деформаций, коррозионные повреждения;

– логико-вероятностные методы расчета для оценки надежности работы механизмов и электрооборудования.

Так, ПК представляется в виде модели многоуровневой технической системы, находящейся в разное время в различных состояниях, включающей 3 блока: металлоконструкции, электрооборудования, механизмов крана.

Анализ проводится методом дерева неисправностей, использующим информацию об исходных событиях (отказах элементов механизмов и электрооборудования и основных несущих элементов металлоконструкции).

Вершина дерева неисправностей ПК представлена на рис. 1, где Е – аварийный случай, возникший в ходе эксплуатации по причине отказа элементов электрооборудования, приводов механизмов или металлоконструкции (полный отказ системы); Э – аварийный случай, возникший при отказе электрооборудования портального крана; П – аварийный случай, возникший при отказе привода механизма портального крана; М – аварийный случай, возникший при отказе элементов металлоконструкции портального крана. События Э, П, М соединены логическим оператором «или», то есть главное событие Е может произойти при наступлении любого из событий.

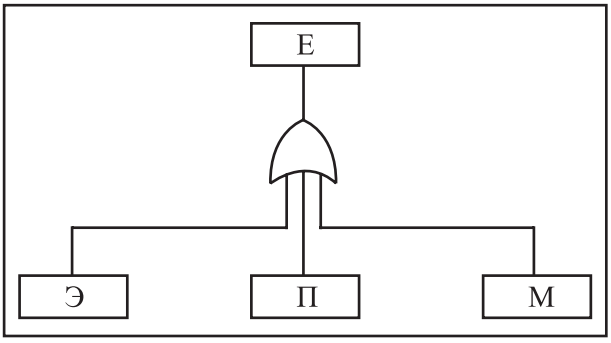

Рис. 1. Вершина дерева неисправностей портального крана

На начальном этапе оценки риска выявляются все источники опасности – идентификация опасностей. Вершина дерева неисправностей последовательно расширяется для каждого логического оператора таким образом, чтобы на нижнем уровне схемы находились элементарные исходные события. После этого составляется алгоритм сочетаний различных случайных событий, способных привести к аварийной ситуации. Не попавшие в алгоритм элементарные исходные события далее не рассматриваются.

В качестве примера на рис. 2 приведен структурный анализ схемы электрооборудования механизма поворота ПК «Альбатрос 10/20-32/16», для которого определены причинные взаимосвязи событий наступления аварийной ситуации. Главным является событие $Э_{пов}$ – авария, возникающая в случае неуправляемого вращения груженого грузозахватного устройства.

Указанное событие возникает при одновременном сочетании промежуточных моментов, соединенных логическим оператором «и»:

e_1 – нахождение рабочих и транспортных средств в зоне работы ПК;

$Э_1$ – отсутствие возможности остановить механизм.

Отсутствие возможности остановить механизм состоит из следующих событий, соединенных логическим оператором «и»:

e_2 – отказ реле тормоза;

e_3 – отказ реле реверсивного поворота;

$Э_{11}$ – не сработало аварийное выключение силовой линии.

Отсутствие возможности выключения силовой линии включает в себя следующие события, соединенные логическим оператором «или»:

e_4 – отказ блока аварийного выключения;

e_5 – «человеческий фактор», вызванный тем, что машинист ПК не включил аварийное выключение в случае чрезвычайной ситуации.

Вероятность наступления аварийного события оценивалась при помощи формул классической вероятности как комбинация совместных и несовместных событий. На основании анализа дерева неисправностей была получена расчетная формула для оценки риска аварии вследствие отказа группы элементов механизма поворота:

$$P_{Э.пов}(t) = P(E_1) + P((1 - E_1) \cdot e_1)), \quad (1)$$

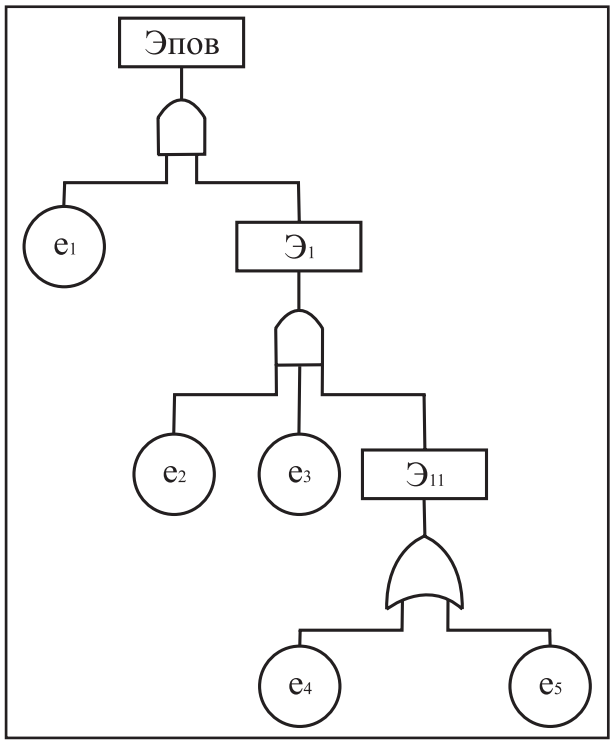

Рис. 2. Дерево неисправностей электрооборудования механизма поворота портального крана «Альбатрос 10/20-32/16»

$$P(E_1) = P(e_2) + P(e_3) + P(E_{11}) - P(e_2 \cdot e_3) - P(e_2 \cdot E_{11}) - P(E_{11} \cdot e_3) + P(e_2 \cdot e_3 \cdot E_{11}), \quad (2)$$

$$P(E_{11}) = P(e_4) + P(e_5), \quad (3)$$

$$P_{ei}(t) = 1 - e_{ei}^{-\lambda_{ei} t}, \quad (4)$$

где λ_{ei} –интенсивности исходных событий;

$$Q_{Э.пов}(t) = 1 - P_{Э.пов}(t), \quad (5)$$

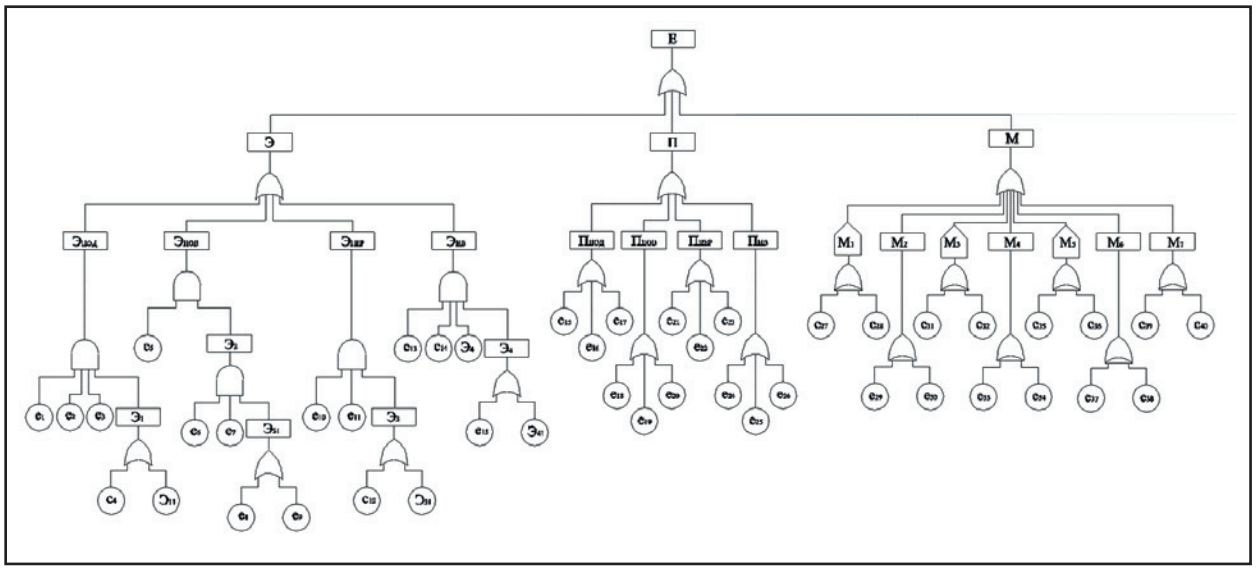

Рис. 3. Главное дерево неисправностей портального крана (в общем виде)

Таблица 2

Информационная таблица для количественной оценки риска портального крана

№ п/п	Элемент оборудования	Событие	Обозначение события	Оценка вероятности отказа	
				Интенсивность отказа λ , 1/ч	Вероятность наступления исходного события F
1	2	3	4	5	6

где $Q_{Э.пов}(t)$ – риск аварии ПК, возникающей в случае неуправляемого вращения груженого грузозахватного устройства.

После оптимизации деревьев неисправностей структурных элементов ПК и обобщения данных по анализу аварийных сочетаний случайных событий, составляется главное дерево неисправностей, в общем виде приведенное на рис. 3.

В зависимости от условий работы, типа ПК, конструктивных особенностей, данных о проведенных ремонтах и модернизации, дерево неисправностей корректируется для получения более качественных результатов.

Данные для расчета оценки риска эксплуатации ПК вносятся в соответствующую информационную таблицу, включающую виды оборудования, типы отказов, интенсивности отказов и вероятности наступления случайных событий (таблица 2).

Предложенная методика оценки риска эксплуатации использовалась, например, для портального крана «Альбатрос 10/20-32/16» ПАЛ 57 1978 года выпуска, работающего в ОАО «Северный речной порт» (г. Москва), и показала сопоставимые с практикой результаты. По мнению авторов статьи, предлагаемая методика может быть использована при разработке документа по обоснованию безопасности ПК, находящихся в эксплуатации, так же после проведения ремонта, реконструкции, технического диагностирования.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Технический регламент «О безопасности машин и оборудования» (утвержден постановлением Правительства РФ № 753 от 15 сентября 2009 г.).
2. ГОСТ Р 51901.12-2007 «Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов».
3. ГОСТ 27.310-95 «Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения».

УЧРЕЖДЕНИЕ: Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

ТЕМА: Методика оптимизации эксплуатационных показателей флота судоходной компании

АВТОРЫ: В.Г. ФОМИН, кандидат технических наук, профессор;
П. Н. КАРАБУТОВ, аспирант

Вопросам оптимизации движения судов по транспортной сети уделяется много внимания [1-5 и другие].

Одним из основных критериев, отражающих состояние эксплуатационных показателей, является расход топлива. Он может зависеть от различных факторов: мощности энергетической установки, скорости движения судна, фарватера и режима работы главных дизелей. Оптимальность расхода топлива можно оценивать с помощью различных аспектов в конкретной ситуации.

В большинстве применяемых подходов эксплуатационные показатели описывались алгебраическими зависимостями, которые с изменением условий движения или экономической ситуации не всегда адекватно отражали текущее состояние флота или судоходной компании. Кроме того, в предлагавшихся подходах не всегда учитывался характер изменения стояночного времени судна, которое очень часто носит случайный характер. Все это, очевидно, сказывалось на эффективности получаемых оптимальных решений и требовало коррекции расчетных показателей.

Стоит отметить, что в современных условиях в процессе движения судна могут возникать риски, для учета которых необходимо совершенствование существующих методов оптимизации.

В настоящей статье предлагается подход к оптимизации эксплуатационных показателей флота судоходной компании, основанный на применении математической модели, описывающей изменение расхода топлива в зависимости от скорости движения судна по определенной линии и закона распределения стояночного времени с учетом возникающих рисков. Рассматривается задача минимизации эксплуатационных показателей работы флота судоходной компании.

Часовой расход топлива P_i в зависимости от скорости движения vi рассчитывается на основе модели $P_i=f_i(v_i)=f_i(t_i)$, а стояночное время $t_{СТ,i}$ судна на i-м участке транспортной сети подчиняется закону распределения:

$$p(t_{ст}) = \mu e^{-\alpha t_{ст}}, \quad (1)$$

параметры которого получены на основе данных, извлекаемых с помощью OLAP-анализа из информационной базы данных [6].

Необходимо обеспечить минимизацию функционала:

$$Q_k(t_i) = \min_{t_i} \sum_{i=1}^{k} f_i(t_i)t_i, \quad (2)$$

при соблюдении следующих ограничений:

$$Q_k(t_i) = \min_{t_i} \sum_{i=1}^{k} f_i(t_i)t_i$$

и фиксированной длине транспортной сети (линии):

$$S = \sum_{i=1}^{k} s_i, \qquad (3)$$

где $\underline{v}_i, \overline{v}_i$ — заданные величины, s_i — отрезки пути, на которых соблюдается постоянство условий плавания. T^* зависит от стояночного времени $t_{CT,i}$ для каждого участка транспортной сети.

В задачах оперативного управления флотом судоходной компании могут появляться риски, которым можно сопоставить некоторую вероятность их возникновения.

Риски могут носить как экономический, так и технический характер, а иногда возникать по причине «человеческого фактора». Чаще всего их уровень устанавливается на основе анализа опроса экспертов.

В большинстве случаев риски приводят к увеличению стояночного времени, поэтому для их учета можно применить математическую модель распределения стояночного времени в виде загрязнения основного распределения (1):

$$S = \sum_{i=1}^{k} s_i, \qquad (4)$$

где $\varepsilon \geq 0$ — параметр, задающий уровень загрязнения, $p_1(t_{CT})$ — функция распределения, учитывающая влияние рисков.

Тогда первоначальная постановка задачи модифицируется с заменой (1) на (4).

Важно, что кроме задания зависимости (4), учитывающей влияние рисков, можно также применить подход, основанный на анализе уровня рисков, устанавливаемых экспертами.

При прогнозировании p_i нередко используются линейные статические и динамические модели [6].

Для решения приведенной оптимизационной задачи разработана методика, основанная на применении модуля «Поиск решения» в программе Microsoft Excel. Алгоритм, лежащий в основе методики, показан на рис. 1.

Для учета фарватера реки осуществляется адаптация параметров модели с помощью итерационных алгоритмов.

Табличная модель представляет собой запись исходных условий, ограничений и начального плана решения задачи, пригодного для последующего ее решения с помощью выбранного численного метода.

Приведем пример реализации предложенной методики.

В качестве исходной информации для синтеза моделей использовались OLAP-данные по перевозке грузов судами компании «Авизейра». Они же служили в качестве эталона для проверки адекватности полученного оптимального решения задачи. Оптимальное решение находилось с помощью применения итерационного квазиньютоновского метода и метода сопряженных градиентов.

Сначала определялось базовое решение задачи движения теплохода ГТ-26 по линии без учета рисков (ε=0 в (4)) при значениях распределения стояночного времени, представленных в табл. 1.

Полученное оптимальное решение задачи для судна ГТ-26 показано на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что оптимальный план движения судна ГТ-26 по линии позволяет сэкономить 1057,43 кг топлива от реально затраченного и сократить время на 9 часов.

Если сравнить полученные решение с результатами, представленными в [6], то можно сделать вывод о том, что применение более адекватных математических моделей, описывающих изменение Pi, позволяет получить существенный экономический эффект за счет повышения точности прогноза расхода топлива. Полученный оптимальный расход топлива по линиям приведен в табл. 2.

Далее решалась задача с учетом рисков. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Изменения уровня рисков влияют на параметры ограничений, что требует проведения экономического анализа реализуемости предлагаемых решений

2. Наиболее чувствительным к рискам является последний участок линии, так как он является наименее протяженным.

3. Полученное базовое оптимальное решение является относительно грубым по отношению к вариациям параметров ограничений и позволяет поддерживать на приемлемом уровне эксплуатационные показатели.

Пример влияния уровня рисков на оптимальное значение скорости движения судна ГТ-26 показан на рис. 3. На рисунке в скобках указан уровень рисков для каждой из линий по всем вариантам.

Как и следовало ожидать, изменение ограничений (ужесточение требований) приводит к снижению скорости движения по сравнению с базовым вариантом.

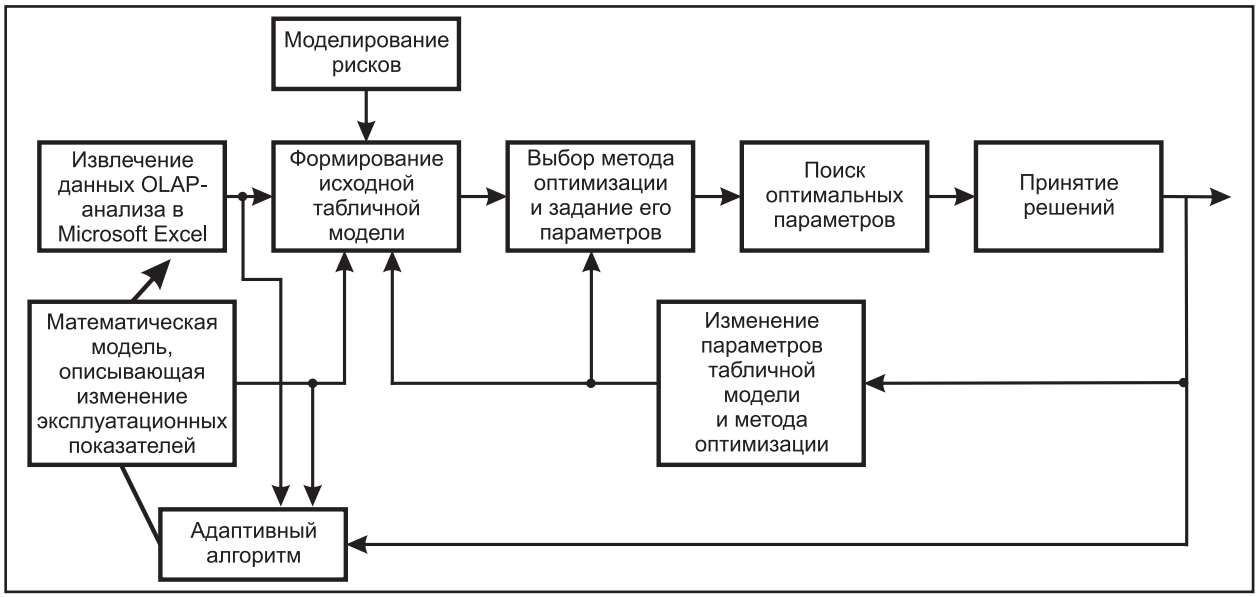

Рис. 1. Процедура нахождения оптимального решения задачи оптимизации эксплуатационных расходов

Таблица 1

Значения стояночного времени по линии Череповец – Порт

Череповец – Рыбинск	Шлюз № 11 – Городец	Городец – Чебоксары	Чебоксары – Тольятти	Порт	Суммарное время
0,98	1,10	1,19	0,95	0,95	85,50

Таблица 2

Оптимальный расход топлива по участкам линии

Череповец – Рыбинск	Шлюз № 11 – Городец	Городец – Чебоксары	Чебоксары – Тольятти	Порт	Суммарный расход
289,37	1246,11	645,76	1675,44	21,90	3878,57

Затем решалась задача оптимизации движения флота (суда ГТ-19, 25, 26) компании «Авизейра» по транспортной сети.

Результаты моделирования показали, что адекватность предварительно полученной линейной математической модели для судна ГТ-26 оказалась невысокой. Поэтому в процесс оптимизации был включен блок «Адаптивный алгоритм» (рис. 1) для настройки ее параметров.

А для судов ГТ-19, 25 адекватность моделей получилась высокой. Были определены оптимальные значения скоростей и расхода топлива судами. Разработаны квазиоптимальные варианты принятия решений из условия обеспечения допустимого уровня эксплуатационных расходов.

В заключение стоит отметить, что предложенная методика оптимизации эксплуатационных показателей флота судоходной компании, реализованная на базе Microsoft Excel, по результатам моделирования работоспособна.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Савин В.И., Неволин В.В., Захаров В.Н. и др. Автоматизированная система управления водным транспортом. — М.: Транспорт, 1985. – 238 с.
2. Пьяных, С.М. Экономико-математические методы оптимального планирования работы речного транспорта. – М.: Транспорт, 1988. – 250 с.
3. Савин В.И. Математические методы оптимального планирования работы флота и портов. – М.: Транспорт, 1969. – 168 с.
4. Фомин В.Г. Оптимальные скорости грузовых теплоходов при движении по рекам с ограниченными глубинами // Труды ЦНИИЭВТ. 1972. – Вып. 92. – С. 86–109.
5. Пьяных, С.М. Элементы оптимизации управления работой флота. – Горь-кий: ГИИВТ, 1970. 150 с.
6. Карабутов Н.Н., Иванов М.И. Применение информационных технологий в системах оперативного управления на водном транспорте. – М.: Изд-во «Альтаир-МГАВТ».

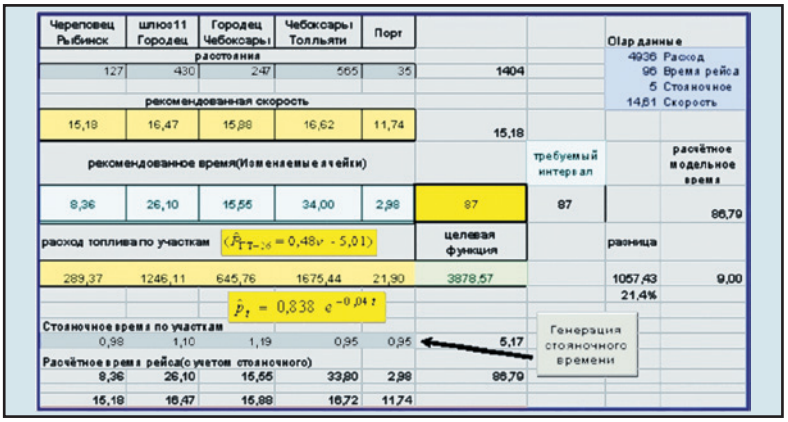

Рис. 2. Результаты поиска оптимального плана на основе исходной табличной модели

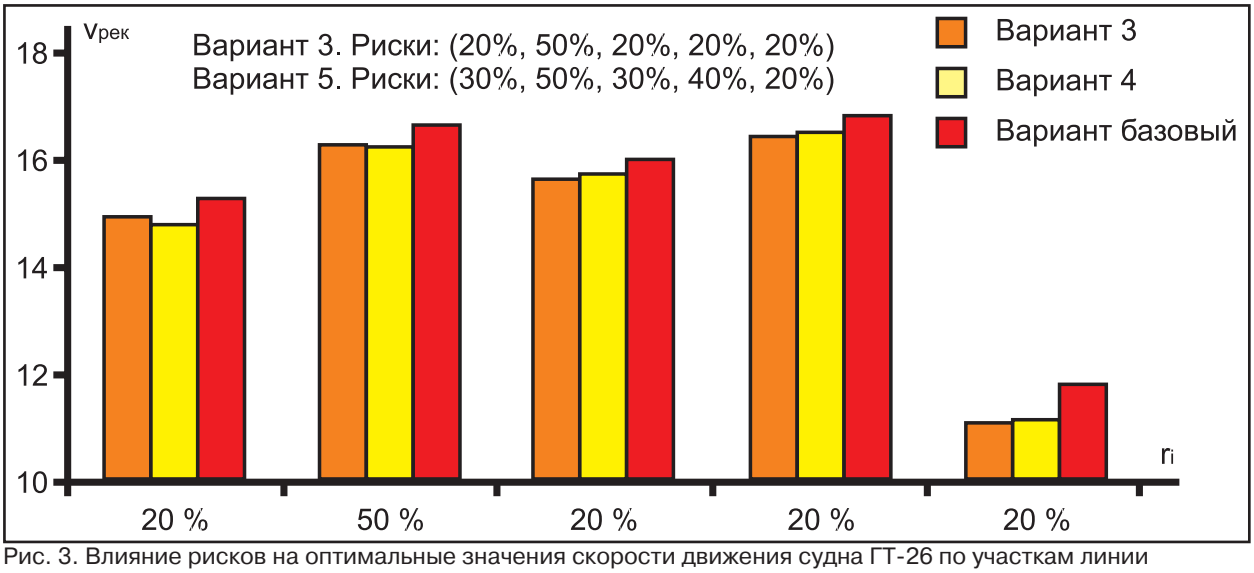

Рис. 3. Влияние рисков на оптимальные значения скорости движения судна ГТ-26 по участкам линии

УЧРЕЖДЕНИЕ: Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций (СПГУВК)

ТЕМА: Параметрическое управление состоянием динамических систем водного транспорта

АВТОР: А.В. САУШЕВ, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок»

Процесс управления состоянием динамических систем (ДС) водного транспорта включает целый комплекс задач анализа и синтеза, решаемых на различных этапах и стадиях их жизненного цикла. До последнего времени эти задачи рассматривались изолированно и независимо одна от другой, хотя при более общем взгляде все они оказываются тесно связанными. Объединяющим началом является то, что их решение сводится к изучению целенаправленных и случайных процессов изменения структуры и параметров элементов ДС, определяющих качество их работы, способы и принципы управления процессами.

Под «состоянием» будем понимать внутреннюю определенность ДС, характеризуемую в заданный момент времени признаками, установленными технической документацией, которые являются начальными условиями процессов их дальнейшего изменения [1].

Под «признаком» будем понимать количественные (параметры) и качественные характеристики определяющих ДС свойств.

Совокупность внутренних свойств ДС и их характеристик в некоторый фиксированный момент времени определяет ее внутреннее, или материально-структурное состояние. Оно характеризуется сочетанием состояния комплектующих элементов ДС и ее коммутационного состояния, которое определяется видом структуры системы, и в частности положением различных переключающих устройств, связанных с пуском, реверсом, включением нагрузки, блокировки и т. п. Совокупность функциональных свойств и выходных параметров ДС в некоторый фиксированный момент времени определяет ее функциональное состояние.

Кроме рассмотренных видов состояний, можно также выделить состояние среды, которое определяет режим работы ДС, т. е. является режимным состоянием (в широком смысле). В связи с тем что часть внешних воздействий целенаправленно изменяют (задают) обслуживающий персонал или автоматы, состояние среды целесообразно представить двумя группами: режимом работы (в узком смысле) и состоянием условий использования ДС, которые определяются атмосферными условиями, степенью «нагруженности» элементов, качеством технического обслуживания и ремонта и т. п. Все множества состояний ДС взаимосвязаны и соответствуют многообразию различаемых в эксплуатации видов технического состояния.

В самом общем случае модель эволюции состояния ДС должна отражать количественные и качественные изменения, которые происходят в ее элементах во всех возможных режимах работы с момента начала эксплуатации до наступления предельного состояния. Представим эту модель в виде графа (рис. 1) с конечным набором состояний, общее число которых определяется технической возможностью или заданной точностью распознавания двух смежных состояний. Для раскрытия сущности эволюции состояния ДС следует выделять структурные и параметрические возмущения [1].

Параметрические возмущения обусловлены непрерывным изменением интенсивности свойств комплектующих элементов ДС вследствие их старения, износа и действия внешних возмущающих воздействий. Эти возмущения приводят к непрерывному накоплению параметрических отклонений и, как следствие, к изменению запаса работоспособности системы, каждому уровню которого в соответствии с заданной дискретностью ставится в соответствие определенное состояние. Структурные возмущения, в отличие от параметрических, приводят к накоплению структурных отклонений и, как следствие, к потере одного или нескольких свойств комплектующих элементов ДС, что отражается на изменении структуры системы и, в конечном счете, приводит к ее внезапному отказу.

Представленный на рис. 1 граф дополняет установленные стандартом виды технических состояний. Рассмотрим их:

{a1} – множество исправных состояний, различающихся объемом накопленных параметрических отклонений, которым соответствуют различные уровни $\rho_0, \rho_1, \ldots, \rho_{d-1}$ запаса работоспособности системы;

{b1} – множество работоспособных состояний, которые в общем случае различаются объемом накопленных параметрических и структурных отклонений. Различный объем структурных накоплений может иметь место, например, в ДС с резервированием;

{c1} – множество состояний правильного функционирования, различающихся объемом накопленных параметрических и структурных возмущений;

{a2} – множество состояний, при которых ни в одном режиме работы не выполняются внешние условия работоспособности, т. е. система выполняет возложенные на нее функции, но один или несколько показателей качества находятся за допустимыми пределами. Вместе с тем в системе отсутствуют структурные отклонения и, как следствие, внезапный отказ;

{b2} – множество состояний, отличающихся от множества {a2} тем, что в системе имеют место структурные отклонения, которые, однако, не привели к внезапному отказу;

{c2} – множество состояний, отличающихся от множества {b2} тем, что в системе имеет место внезапный отказ и она выполняет возложенные на нее функции с недопустимо низким уровнем качества лишь в одном или нескольких (но не всех) режимах работы;

{a3} – множество состояний, различающихся уровнем параметрических отклонений, при которых система неспособна выполнять возложенные на

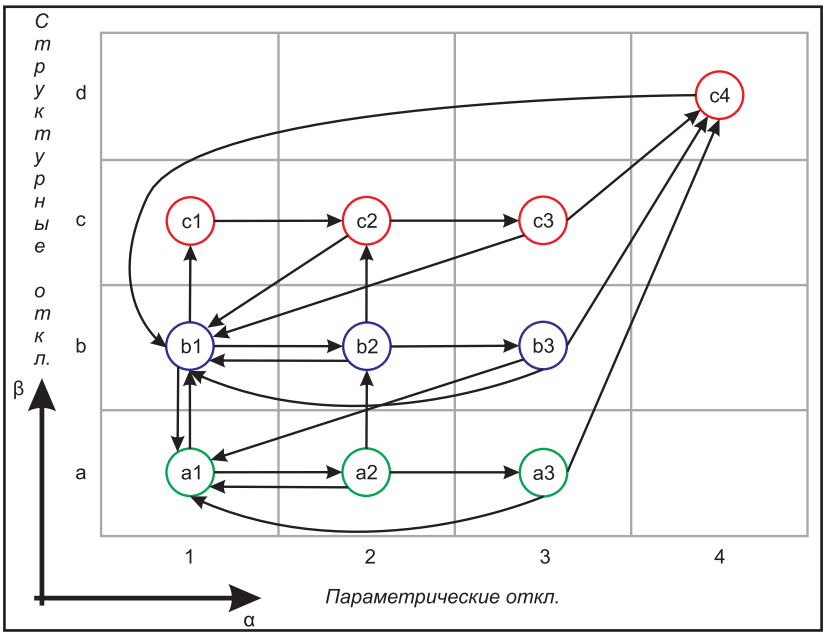

Рис. 1. Граф эволюции состояния динамической системы

нее функции из-за исключительно низкого уровня ее качества. Вместе с тем в системе отсутствуют структурные отклонения;

{b3} – множество состояний, отличающихся от множества {a3} тем, что в системе имеют место структурные отклонения, которые, однако, не привели к внезапному отказу;

{c3} – множество состояний, отличающихся от множества {c2} тем, что ДС неспособна выполнять возложенные на нее функции из-за крайне низкого уровня качества.

{d4} – множество состояний, различающихся уровнем параметрических и структурных отклонений, при которых ДС находится в предельном состоянии и физически не может выполнять возложенные на нее функции (показатели назначения находятся на нулевом уровне).

Качество и эффективность работы ДС определяются способами управления процессами формирования и сохранения ее необходимых свойств и значений параметров на всех этапах и стадиях жизненного цикла: при исследовании, проектировании, изготовлении, обращении, эксплуатации. При этом под «управлением состоянием» ДС будем понимать целенаправленный процесс изменения управляющих воздействий, внутренних параметров и структуры системы с целью предупреждения и устранения отказов ее элементов и достижения оптимального по заданному критерию качества функционирования.

В наиболее общем виде процесс управления состоянием ДС, охватывающий все стадии и этапы ее жизненного цикла, можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рис. 2.

В качестве объекта управления выступают свойства и параметры ДС и составляющих ее элементов. Можно выделить 3 контура управления состоянием – параметрическое, координатное и структурное. Параметрическое управление предполагает целенаправленное воздействие на первичные параметры X ДС. При координатном управлении эти воздействия представляют собой изменение параметров входных сигналов u и параметров внешних воздействий v, определяющих условия эксплуатации ДС. При структурном управлении управляющими воздействиями являются изменения состава элементов ДС и (или) связей между ними. Необходимым условием для реализации любого контура управления является возможность определения состояния ДС и ее элементов в любой момент времени.

При оперативном управлении по состоянию принятие оперативного решения (ПОР) осуществляется с учетом требований заданного критерия работоспособности K_p ДС. Принятие статистического решения (ПСРп и

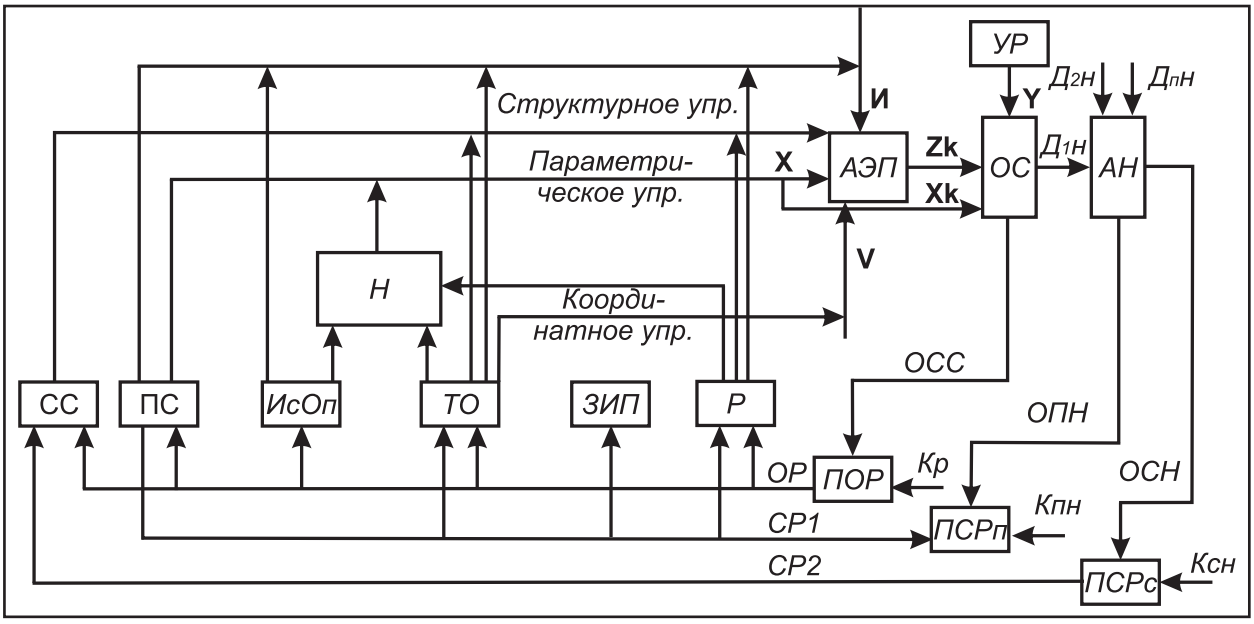

Рис. 2. Структура процесса управления состоянием ДС

ПСРс) производится на основе оценки параметрической надежности (ОПН) и оценки структурной надежности (ОСН), которые получают в результате анализа надежности (АН) по донесениям $Д_{1н}$, $Д_{2н}$, ..., $Д_{пн}$ → об изменениях технического состояния, постепенных и внезапных отказах элементов ДС. При этом учитываются требования критерия параметрической надежности $K_{пн}$ и критерия структурной надежности $K_{сн}$. Оперативное решение (ОР) определяет на стадии эксплуатации ДС необходимый объем технического обслуживания (ТО) или ремонта (Р) по состоянию, а также виды структурного синтеза (СС).

Параметрическое управление при испытании опытных образцов (ИсОп) осуществляется в результате выполнения операции настройки (Н). Структурный синтез реализуется в виде функций реконфигурации структуры системы и аварийной защиты. На стадии проектирования решение предполагает выполнение структурного синтеза (поиск варианта технического решения, выбор оптимального по заданному критерию варианта) и параметрического синтеза (ПС).

Статистическое решение (СР1) на стадии эксплуатации предусматривает регламентированное техническое обслуживание и ремонт, а на стадии проектирования – реализацию задачи параметрического синтеза по критерию, учитывающему показатели параметрической надежности ДС. Статистическое решение (СР2) предполагает на стадии проектирования реализацию функции резервирования с целью обеспечения требуемой структурной надежности [1, 2].

Рассмотренный процесс управления состоянием ДС является замкнутым. Важнейшей задачей, как видно из рис. 2, является реализация процесса параметрического управления состоянием ДС. Для оптимального управления этим процессом необходима разработка теории, методов и средств по комплексному решению задач параметрического синтеза, настройки и оценки состояния ДС на различных этапах ее жизненного цикла.

Задача параметрического синтеза, результатом которой является определение номинальных значений управляемых параметров (номиналов) ДС и допустимых пределов их изменения (допусков), решается на этапе эскизного проектирования. Управляемыми параметрами обычно являются первичные параметры системы, к которым, например, относятся коэффициенты усиления и постоянные времени ДС. Расчет внутренних параметров, оптимальных с позиции некоторого критерия при заданной структуре системы, называют параметрической оптимизацией. Помимо оптимизации номиналов и допусков параметрическая оптимизация в общем случае подразумевает и решение задачи оптимизации технических требований, предъявляемых к внутренним параметрам системы.

Оптимизация технических требований и допусков отличается от оптимизации номиналов тем, что здесь в итоге определяется не одна точка, характеризующая номинальные значения первичных параметров, а некоторая область в пространстве этих параметров. Данная область определяет классы точности комплектующих элементов системы и характеризует диапазоны допускаемых значений параметров, при которых обеспечивается правильное функционирование системы, а также достигается экстремальное значение выбранной целевой функции.

Процесс решения рассмотренных выше оптимизационных задач – итерационный и предполагает неоднократное выполнение задач анализа, позволяющих оценить состояние системы при различных вариантах ее структуры и некоторых фиксированных значениях внутренних параметров. Такая оценка возможна в результате выделения опорных значений параметров ДС.

Для первичных параметров X опорными значениями параметров являются:

– $X_{ном}$ – номинальное значение, которое служит началом отсчета отклонений;

– $X_{доп}$ – допустимое наибольшее (или наименьшее) значение параметра, при достижении которого недопустимо снижается качество функционирования ДС;

– $X_{пред}$ – предельное значение параметра, которое обычно обусловлено невозможностью его физической реализации.

Для опорных значений параметров справедливо соотношение:

$$\left|X_{ном}\right| < \left|X_{доп}\right| < \left|X_{пред}\right|.$$

Для выходных параметров Y и внутренних параметров Z_V, являющихся переменными состояния на выходах элементов ДС, к опорным параметрам относятся:

– $Y_{доп}$ ($Z_{доп}^V$) – допустимое значение параметра, которое определяется техническими требованиями, устанавливаемыми при составлении технического задания на стадии проектирования ДС или ее элемента. Их нарушение ведет к снижению эффективности применения ДС по назначению;

– $Y_{пред}$ ($Z_{пред}^V$) – предельное значение параметра, т. е. такое расчетное наибольшее или наименьшее его значение, при достижении которого функционирование ДС, с точки зрения выполнения возложенных на нее функций, становится невозможным;

– $Y_{кр}$ ($Z_{кр}^V$) – критическое значение параметра, при котором работа ДС принципиально невозможна.

Для опорных значений выходных параметров Y и внутренних параметров Z_V выполняется соотношение:

$$\left|Y_{доп}(Z^v_{доп})\right| < \left|Y_{пред}(Z^v_{пред})\right| < \left|Y_{кр}(Z^v_{кр})\right|.$$

Важным результатом анализа является ответ на вопрос: выполняются или не выполняются условия работоспособности, под которыми понимаются необходимые условия безотказной работы системы, выраженные в виде неравенства:

$$Y_{j\,min} \le Y_j = F_j(X) \le Y_{j\,max},\ j = \overline{1,m},$$

$$Z^v_{j\,min} \le Z^v_j = F^v_j(X) \le Z^v_{j\,max},\ v = \overline{1,h},$$

$$X_{i\,min} \le X_i \le X_{i\,max},\ i = \overline{1,n},$$

где Y_{jmax} (Z_{jmax}^V), Y_{jmin} (Z_{jin}^V), Y_j (Z_j^V) – соответственно максимально и минимально допустимое и текущее значение j-го выходного (внутреннего) параметра.

Первое неравенство является внешним условием работоспособности, второе и третье – внутренними условиями работоспособности. Эти условия определяют область работоспособности G, составляющей множество допустимых значений первичных параметров, при которых выполняются все требования, предъявляемые к выходным и внутренним Z^V параметрам системы. Форма области G может иметь весьма сложную конфигурацию [4].

Различают задачи определения и назначения допусков. Под «определением допусков» понимается решение задачи построения области работоспособности, которая обычно задается в виде совокупности граничных точек. Под «назначением допусков», как правило, подразумевают решение задачи аппроксимации области работоспособности гиперпараллелепипедом (брусом) наибольшего объема, который может быть вписан в эту область или описан вокруг нее.

Для контура параметрического управления состоянием ДС основными показателями качества, определяющими выбор целевой функции при оптимизации системы, являются показатели назначения, надежности и экономичности.

Показатели назначения характеризуют свойства ДС, определяющие основные функции, для выполнения которых она предназначена. Можно выделить 4 группы этих показателей, которые также называют критериями качества. Они характеризуют динамические свойства ДС.

К первой группе относятся показатели, в той или иной степени использующие для оценки качества сигнал рассогласования в различных типовых режимах. Это группа критериев точности. Точность, характеризующая установившийся режим работы системы, однозначно оценивается величиной ошибки, равной разности между требуемым и действительным значениями управляемого сигнала.

Во вторую группу входят показатели, характеризующие устойчивость работы ДС. Для оценки устойчивости применяются такие показатели, как перерегулирование, число колебаний, наблюдаемое за время регулирования, запас устойчивости по амплитуде и фазе и т. д.

К третьей группе относятся показатели, характеризующие быстродействие ДС: длительность переходного процесса, время нарастания, резонансная частота колебаний и т. д.

В составе четвертой группы – комплексные критерии, оценивающие обобщенные свойства, учитывающие точность, запас устойчивости и быстродействие.

К показателям, характеризующим статические свойства ДС, относятся показатели технической эффективности, например, показатели энергетической эффективности системы. Для интегральной характеристики как динамических, так и статических свойств ДС используют показатель качества функционирования системы, – то есть степень приспособленности системы к выполнению поставленной задачи. Показатель качества функционирования выражает меру полезности системы. Для определения значений таких показателей рассматривают результаты применения системы по назначению.

Показатели надежности характеризуют свойства ДС, определяющие ее способность сохранять работоспособное состояние при использовании системы по назначению.

Основным показателем, характеризующим параметрическую надежность ДС, является вероятность безотказной работы. Он может быть записан как вероятность удовлетворения условий работоспособности:

$$P_п(T) = P_T(X_н, l) = P\{Y_j(X(t)) \in$$

$$\in [Y_{j\,min}, Y_{j\,max}],\ j = \overline{1,m}, \forall t \in [0,T]\}$$

или как вероятность принадлежности вектора первичных параметров X области G:

$$P_п(0) = P_0(X_н, l) = P\{Y_j(X_н) \in$$

$$\in [Y_{j\,min}, Y_{j\,max}],\ j = \overline{1,m}, \forall t \in [0,T]\},$$

где $X_н=[X_{1н}, \ldots, X_{iн}, \ldots X_{nн}]^T$, $l=[l_1, \ldots, l_i, \ldots l_n]^T$ – векторы соответственно номинальных значений параметров и относительных допусков на них (полей рассеивания), задаваемых классами точности элементов;

$X(t)=[X_1(t), \ldots, X_i(t), \ldots X_n(t)]^T$ – векторный случайный процесс изменения параметров элементов в интервале времени [0,T]. При T=0 выражения примут вид:

$$P_п(0) = P_0(X_н, l) = P\{Y_j(X_н) \in$$

$$\in [Y_{j\,min}, Y_{j\,max}],\ j = \overline{1,m}\},$$

$$P_п(0) = P_0(X_н, l) = P\{X \in G\}.$$

Вероятность $P_п(0)$ характеризует серийнопригодность, под которой понимают свойство элементов ДС сохранять выходные параметры в установленных пределах на момент изготовления.

Наряду с вероятностью безотказной работы для характеристики надежности по отношению к постепенным отказам, а также для оценки серийнопригодности, широкое применение находит показатель, определяющий запас работоспособности системы.

В большинстве трудов запас работоспособности определяют как степень выполнения условий работоспособности и оценивают независимо друг от друга по каждому выходному параметру Y_j, $\overline{1,m}$. При этом запас работоспособности $\lambda_j^C(X)$ обычно вычисляют по формуле:

$$\lambda_j^c(X) = (Y_{jпр} - Y_{jн}(X))/\delta_j - 1, \quad j = \overline{1,m},$$

где $Y_{jпр}$ – предельное (максимальное Y_{jmax} или минимальное Y_{jmin}) допустимое значение j-го выходного параметра Y_j; $Y_{jн}(X)$ – номинальное значение параметра Y_j; $\delta j=Y_{jн}(X)- Y_{pj}(X)$ – параметр нормировки, характеризующий рассеяние параметра Y_j через квантиль $Y_{pj}(X)$ его распределения уровня $P\approx0$.

Приведенное определение запаса работоспособности не отражает сущности данного понятия и не позволяет эффективно его использовать в процессе параметрического управления состоянием ДС. Запас работоспособности следует оценивать на материально-структурном уровне, так как изменение параметра Y_j является лишь следствием изменения первичных параметров системы, а зависимость $Y_j(X)$ является, как правило, нелинейной.

Под «запасом работоспособности» будем понимать степень приближения вектора X_t фактического состояния системы к его предельно допустимому значению $X_п$. Множество предельно допустимых значений вектора определяется границей области работоспособности системы. Степень приближения вектора X_t определяется расстоянием от его конца до ближайшей граничной точки области работоспособности.

Обозначим через $X_г=[X_{г1}, X_{г2}, \ldots, X_{гh}]$ точку на границе области работоспособности. Минимальное расстояние вектора первичных параметров $X_t=[X_{1t}, X_{2t}, \ldots, X_{nt}]$ от вектора $x_г$ по всем значениям граничных точек будет определять запас работоспособности системы ρ. Если вычислены номинальные значения первичных параметров $X_н=[X_{1н}, X_{2н}, \ldots, X_{nн}]$, то может быть найден и номинальный запас работоспособности $\rho_н$, который в этом случае удобно выражать в относительных единицах $\lambda(X)$:

$$\rho = \min[X_г]\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X_{гi})^2},$$

$$\rho_н = \min[X_г]\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_{iн} - X_{гi})^2},$$

$$\lambda(X) = \frac{\rho}{\rho_н}.$$

Запас работоспособности $\lambda(X)$ в отличие от $\lambda_j^C(X)$ учитывает не только внешние, но и внутренние условия работоспособности ДС.

Если область работоспособности является выпуклой, а также известны статистические данные, характеризующие технологический разброс параметров комплектующих элементов ДС при их производстве и данные об изменении этих параметров в процессе эксплуатации системы, то запас работоспособности для одного первичного параметра x_i может быть рассчитан по формуле:

$$\lambda_i(X) = (X_{iн} - X_{iпр})/\delta_i(X) - 1, \quad i = \overline{1,n},$$

где $X_{iпр}$ – предельное (максимальное X_{imax} или минимальное X_{imin}) допустимое значение i-го первичного параметра; $\delta_i(X)$ – параметр нормировки, характеризующий меру рассеяния параметра X_i. Параметр $\delta_i(X)$ можно задать через характеристики рассеяния первичных параметров, задающие их возможные уходы [1].

Экономические показатели характеризуют затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию ДС. С точки зрения проблемы параметрического управления состоянием ДС эти показатели определяют: затраты на информационное обеспечение, связанные с определением состояния ДС; затраты на восстановление работоспособного состояния системы в случае параметрических отказов; классы точности элементов ДС, влияющих на стоимость всей системы.

Для оптимального по какому-либо критерию решения задачи параметрической оптимизации должна быть сформирована целевая функция. Вместе с тем, любая ДС характеризуется не одним, а целым набором показателей качества, каждый из которых характеризует тот или иной аспект функционирования системы.

Как известно, проблему решения задач оптимизации с учетом множества показателей качества (критериев) называют «проблемой решения многокритериальных задач (или задач векторной оптимизации)». Они рассматривались в основном в 3 областях: экономико-математические методы и исследования операций, теория игр, теория оптимальных систем. В результате появилась разнообразие в терминологии, что породило множество схожих методов оптимизации.

Первоначально поиски методов решения задач с векторным критерием оптимальности нередко были направлены на нахождение единственного строгого математического решения, обращающего в экстремум все скалярные критерии. Однако такого решения, как оказалось, объективно не существует. После обнаружения этого факта поиски решения проблемы учета множества показателей были направлены на отыскание метода, который наилучшим образом удовлетворяет всем отдельным показателям. Предполагалось, что такой подход окажется универсальным если не для всех, то хотя бы для большого числа практических задач. Найти этот метод до последнего времени не удалось.

Единственным объективным фактором, характеризующим проблему векторной оптимизации в рамках того субъективизма, который связан с выбором самих локальных критериев, является наличие области Парето-оптимальных решений. Формальное математическое определение множества точек Парето может иметь следующую формулировку: точка $X \in R^n$ называется «точкой Парето» для отображения, если не существует такого приращения ΔX, то $Y_j(X+\Delta X) \geq Y_j(X)$, $i=\overline{1,m}$, причем, по крайней мере, для одной функции имеет место строгое неравенство [3].

Анализ литературных источников показывает, что трудности, имеющие место при решении векторных задач оптимизации, носят не столько вычислительный, сколько методологический характер.

В работах автора [1, 3, 5] установлено, что в качестве целевой функции для решения рассмотренных задач управления состоянием большинства ДС следует использовать запас работоспособности системы. Это особенно актуально для ДС водного транспорта, которые характеризуются изменчивыми и в ряде случаев тяжелыми условиями эксплуатации.

Необходимым условием определения запаса работоспособности является информация о границе области работоспособности ДС. Причем здесь недопустима аппроксимация области работоспособности G вписанным в нее брусом S, поскольку получается чрезмерно высокая методическая погрешность аппроксимации [1, 4, 6].

Разработанные автором статьи методы, алгоритмы, программные средства и технические устройства построения областей работоспособности, параметрического синтеза по критерию запаса работоспособности, контроля состояния применительно к электротехническим системам являются частью автоматизированной системы управления состоянием судового, берегового и другого электрооборудования [1].

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. Саушев А.В. Методы управления состоянием электротехнических систем: СПб.: СПГУВК, 2004. – 126 с.
2. Климов Е.Н. Управление техническим состоянием судовой техники. – М.: Транспорт, 1985. – 199 с.
3. Саушев А.В., Шошмин В.А. Основы инженерного проектирования электротехнических устройств и систем: СПб ЛИВТ, 1993. – 125 с.
4. Саушев А.В. Аналитическое описание областей работоспособности электротехнических систем. Журнал университета водных коммуникаций. – СПб.: СПГУВК, 2009. Вып.4.–с. 34–41.
5. Саушев А.В., Шошмин В.А. Целевая функция в задачах синтеза судовых и береговых электромеханических систем. Речной транспорт. 2010, № 5, с.79–81.
6. Саушев А.В. Метод построения границы области работоспособности электротехнических объектов // Электричество. 1990. № 4 – с.14–19

УЧРЕЖДЕНИЕ: Новосибирская государственная академия водного транспорта (НГАВТ)

ТЕМА: Моделирование ожидаемых результатов оптимизации системы виброшумозащиты

АВТОРЫ: О.В. ЩЕРБАКОВА, старший преподаватель; М.К. РОМАНЧЕНКО, кандидат технических наук, заслуженный рационализатор РФ

Винтовые пружины распространены в подвесках, работающих на снижение вибрации и шума. Это обусловлено их геометрией, позволяющей в широких пределах управлять параметрами жесткости, устойчивости и собственной частоты, что предоставляет возможность уже на стадии проектирования моделировать желаемые результаты.

Рассмотрим винтовые цилиндрические пружины, работающие на растяжение и сжатие. Как известно из сопротивления материалов [5], их расчет на прочность и жесткость одинаков, но для высоких пружин сжатия возникает опасность потери устойчивости.

Определим собственную частоту пружин. Предположим, что спектр частот источника вибрации содержит такие со-

ставляющие, которые приводят к появлению колебаний внутри пружины. В результате происходит рассеивание энергии за счет внешнего трения о воздух и внутреннего трения в материале упругого элемента [1,2,4] .

Модель пружины содержит эквивалентный брус, шарнирно закрепленный по концам. Заменим пружину однородным брусом. При изгибе брус, ненагруженный продольной силой, можно считать классической балкой [4].

В соответствии с методом Рэлея [3] собственная частота определяется по формуле:

$$\lambda = \sqrt{\frac{E \cdot A \cdot \pi^2}{m \cdot l^2}}, \qquad (1)$$

где $C=E \cdot A$ – жесткость;

m – масса длины балки; l – длина балки.

Это – частота первого, самого низкого тона.

Параметры эквивалентного бруса винтовой пружины с равными шагом и диаметром витков выберем как для однородного изотропного материала:

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta}{H}, \quad \delta = \frac{4C \cdot \Delta}{\pi \cdot D^2}, \qquad (2)$$

где $E = \frac{4C \cdot H}{\pi \cdot D^2}$ – модуль упругости эквивалентного бруса;

H – высота пружины; δ – напряжение; ε – упругая деформация; Δ – критическая деформация; D – средний диаметр пружины.

Жесткость пружины рассчитываем по выражению:

$$C = \frac{G \cdot d^4}{8D^3 \cdot n}, \qquad (3)$$

где d – диаметр витка; n – число витков; G – модуль сдвига.

Из соотношения (2) модуль упругости равен:

$$E = \frac{C \cdot l}{A}. \qquad (4)$$

Собственная частота пружины получается предположительно:

$$\lambda = \sqrt{\frac{G \cdot \pi^2}{m \cdot l}}. \qquad (5)$$

Масса пружины:

$$m = \rho \cdot \pi \cdot D \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \qquad (6)$$

где ρ – плотность.

С учетом значения жесткости (3) массы на один метр длины:

$$\lambda = \sqrt{\frac{G \cdot d^2}{2D^4 \cdot \rho \cdot n^2}}. \qquad (7)$$

Далее выберем для исследования цилиндрические пружины, работающие на растяжение с одинаковым диаметром проволоки – 0,78 мм и числом витков – 72, но с различным отношением среднего диаметра от исходного – 7,87 мм. Рассчитаем по формуле (7) их собственные частоты. Полученные данные представлены в таблице 1.

Проиллюстрируем эти цифры графически (рис. 1). Как видно, с увеличением среднего диаметра пружины (для

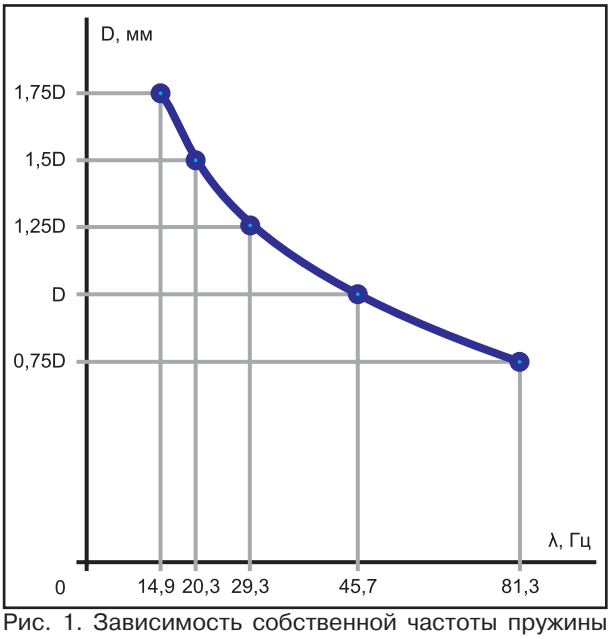

Рис. 1. Зависимость собственной частоты пружины от ее среднего диаметра

пружин с одинаковым числом витков и равным диаметром проволоки) собственная частота уменьшается, что способствует наилучшей виброизоляции.

Статическая устойчивость упругих элементов оценивается запасом по осевой силе. Пружина, находящаяся за границей устойчивости, не может передавать дополнительную нагрузку и не выполняет своего назначения.

Далее рассмотрим устойчивость винтовой пружины при действии постоянной деформации.

Несжатая пружина устойчива всегда. Если пружина достаточно длинная, то при некоторой деформации сжатия она выпучивается и принимает такую форму, когда потенциальная энергия деформации минимальна. Для виброизоляции это явление полезно: понижая устойчивость пружины, можно получить желаемый коэффициент жесткости, не повышая габариты (как это неизбежно в пружинах растяжения). Снижение устойчивости приводит к уменьшению собственной частоты поперечных колебаний, что может быть использовано для шумоизоляции.

Исследуем пружину, работающую на сжатие (рис. 2). Если при медленном нарастании силы пружина сжимается по оси до соприкосновения витков, то она устойчива по всей силовой характеристике, а если начинает заваливаться по-

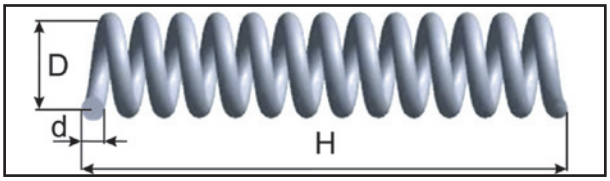

Рис. 2. Пружина, работающая на сжатие

Собственные частоты винтовых пружин

Таблица 1

	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Значение среднего диаметра	D	0,75D	1,25D	1,5D	1,75D
Расчетные собственные частоты (первый тон), λ, Гц	45,7	81,3	29,3	20,3	14,9

Таблица 2

Устойчивость сжатых пружин

	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Значение среднего диаметра	D	0,75D	1,25D	1,5D	1,75D
Расчетные критические деформации, Δ, мм	1,34	0,75	2,09	3,0	4,1
Наибольшая продольная деформация, Δ_{max}, мм	0,78				

перек линии действия силы, то – неустойчива. Такой подход отличается от принятого в сопротивлении материалов для продольного сжатия стержней, но полностью совпадает с формулировкой понятия устойчивости при продольном изгибе [1].

Если в стержнях продольная деформация игнорируется, то в пружинах ее необходимо учитывать. При сжатии пружина запасает энергию, ее изгиб получает запасенную энергию за счет удлинения нейтрального слоя. При изучении устойчивости величины деформации принимают бесконечно малыми.

Для практического использования можно рекомендовать формулу критической деформации, при которой пружина теряет устойчивость [1]:

$$\Delta = \frac{\pi^2 \cdot D^2}{8H}. \quad (8)$$

Стоит отметить несколько вариантов поведения пружины.

Если зазор между витками будет достаточным для критической деформации, то пружина потеряет устойчивость, т.е. выпучится в сторону от оси. Если зазор невелик, то пружина сложится до соприкосновения витков и не потеряет устойчивость.

Число витков пружины равно: $n = \frac{H}{d}$, (9)

Так как между витками имеется зазор, наибольшая продольная деформация пружины составляет:

$$\Delta_{max} = H - n \cdot d. \quad (10)$$

Условие потери устойчивости пружины: $\Delta \le \Delta_{max}$. (11)

Рассчитаем по формулам (8) и (11) устойчивость сжатых пружин. Выберем образцы с одинаковым диаметром проволоки – 0,78 мм и числом витков – 72, но с разным отношением среднего диаметра от исходного – 7,87 мм. Результаты вычислений сведены в таблицу 2.

Анализ цифр показывает, что если у пружин с одинаковой длиной уменьшить средний диаметр от исходного диаметра, то они теряют устойчивость. Чтобы пружина № 2 была устойчива, у нее должно быть максимальное число витков – 70, формулы (8), (9).

Для пружины с заделанными концами, форма потери устойчивости имеет вид синусоиды длиной 2ϖ. Полная критическая деформация пружины удвоится, как и ее длина. Таким образом, получим следующую формулу для вычисления критической деформации пружины, заделанной по концам:

$$\Delta = \frac{\pi^2 \cdot D^2}{2H} = 4{,}935\frac{D^2}{H}. \quad (12)$$

Здесь будет уместна ссылка на поправки Ясинского, используемые в теории продольной устойчивости стержней [1].

Для достоверности полученных теоретических данных требуется дополнительная проверка опытным путем. Возможны расхождения, так как на экспериментальные значения могут повлиять случайные и систематические погрешности.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Барановский А.М. Уравновешивание и виброзащита механизмов. – Новосибирск: НГАВТ, 2006. – 132 с.
2. Барановский А. М., Зуев А.К. Расчет винтовых пружин в опорах судовых двигателей // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт. Часть 1/ Труды второй МНТК 8 – 11 сентября 2004, Тобольск. – 70 – 72 с.
3. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
4. Романченко М.К. Исследование собственных частот пружины // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – №2. – 172– 174 с.
5. Степин П.А. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.

УЧРЕЖДЕНИЯ: Речной учебно-методический центр (РУМЦ); МГАВТ

ТЕМА: Сравнительный анализ качества тренажерной подготовки судоводительского состава судов внутреннего плавания

АВТОРЫ: М.А. ИВАНОВ, начальник учебно-тренажерного отдела РУМЦ; О.В. ДЕМЧЕНКОВ, кандидат технических наук, профессор кафедры «Судовождение» МГАВТ

С 2000 года в соответствии с распоряжением Минтранса России [1] тренажерная подготовка по программе обучения «Использование судовой радиолокационной станции (РЛС) на внутренних водных путях (ВВП)» становится обязательной для следующих категорий судоводителей судов внутреннего плавания:

– капитанов и старших помощников капитанов нефтеналивных и пассажирских судов III и IV групп;

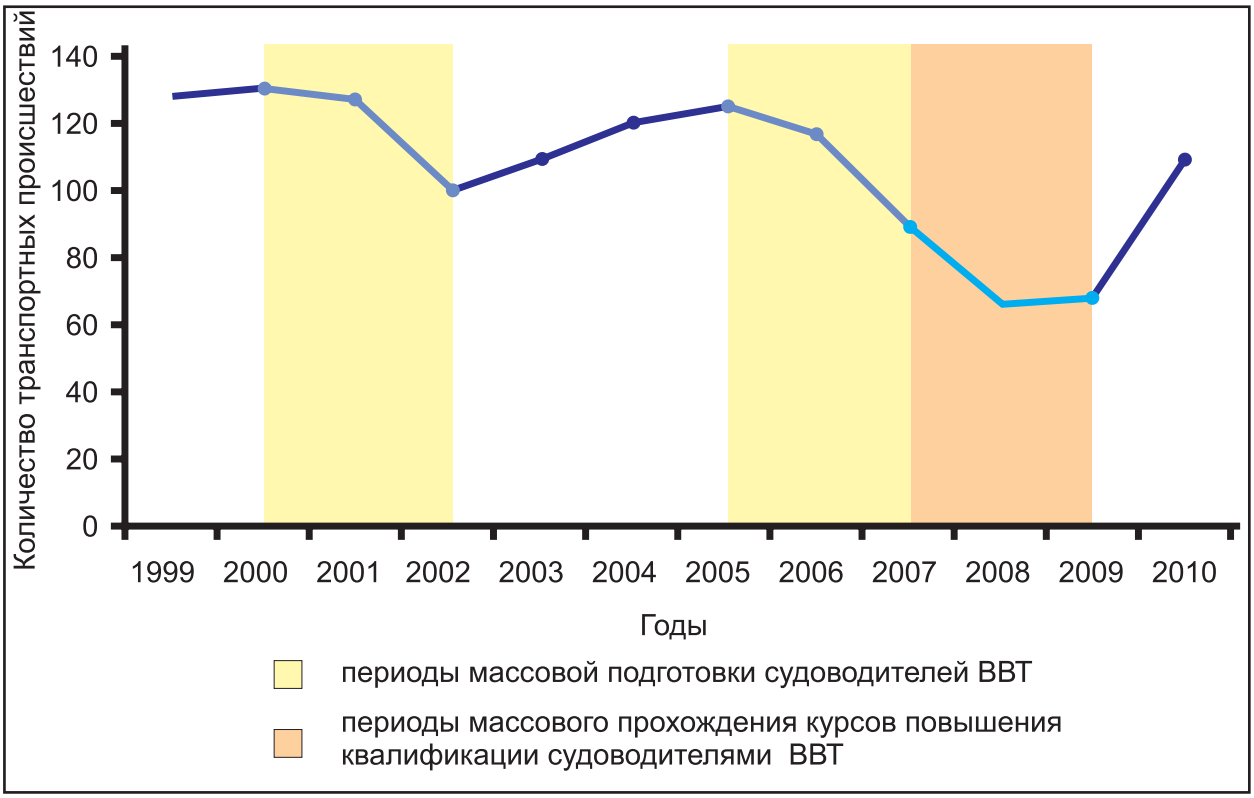

Рис. 1. Количество транспортных происшествий в период 1999-2010 годов

– капитанов и старших помощников капитанов, I и II штурманов всех судов, оборудованных РЛС.

На современном этапе периодичность проведения подготовки/переподготовки составляет 5 лет.

Стоит отметить, что введение тренажерной подготовки как обязательной для судоводительского состава судов внутреннего водного транспорта (ВВТ) действительно повлияло на снижение количества транспортных происшествий (ТП) на ВВП, о чем свидетельствуют данные Государственной речной судоходной инспекции (ликвидирована в мае 2005 года) и Госморречнадзора [2], представленные на рис. 1.

Тенденция к снижению аварийности на ВВТ в первые 2 года после массовой переподготовки судоводителей (2000-2002 годы) с дальнейшим ее ростом в последующие 3 года (2003-2005 годы), казалось бы, должна была в точности повториться и в соответствующие периоды в 2005-2007 и 2008-2010 годах (рис. 1). Однако в 2005 году вступило в действие «Положение о дипломировании членов экипажей судов внутреннего плавания» [3]. В соответствии с ним с 2007 года был предусмотрен «массовый» обмен дипломов плавсостава всех категорий с обязательным прохождением курсов повышения квалификации с использованием навигационных тренажеров.

Именно поэтому в период 2005-2009 годов наблюдалось значительное снижение количества ТП на ВВП по сравнению с 2000-2002 годами. Это согласуется и с результатами статистических исследований авторов статьи по оценке распределения количества обучаемых в 2000-2010 годах. Существование причинно-следственной связи числа ТП на ВВТ с тренажерной подготовкой судоводителей также подтверждается рядом публикаций [4, 5].

К сожалению, несмотря на принятые Минтрансом России превентивные меры по переподготовке судоводителей ВВТ с использованием тренажеров, начиная с 2009 года аварийность на ВВП опять начала возрастать. Следовательно, проблема оценки эфективности тренажерной подготовки и разработка дополнительных мер по снижению числа ТП на ВВТ по-прежнему является актуальной.

Анализ годовых отчетов [2] и материалов по результатам расследований ТП на ВВП позволил сформировать следующий подход к мультикритериальной оценке качества тренажерной подготовки с использованием следующих 2 основных групп критериев:

1) транспортные средства ВВТ (суда, составы и т. п.);
2) участки ВВП.

Для оценки качества тренажерной подготовки по первой группе критериев необходимо знать распределение транспортных средств ВВТ, непосредственно учавствовавших в ТП, и транспортных средств, моделируемых в навигационных тренажерах учебно-тренажерных центров (УТЦ) РФ [5], по следующим категориям:

1.1) по типам транспортных средств;
1.2) в зависимости от мощности главных двигателей в соответствии с выдаваемыми рабочими дипломами лицам командного состава судов ВВТ.

В распоряжении авторов статьи были данные Госморречнадзора только за период 2007-2009 годов. Результаты обработки этой статистики в соответствии с п. 1.1 и 1.2 приведены на рис. 2 и 3.

Из диаграммы на рис. 2 видно, что в ТП в основном участвовали самоходные суда и толкаемые составы. Гистограмма на рис. 3 иллюстрирует, что в ТП доминировали суда первых четырех групп. В свою очередь, в базах данных (БД) навигационных тренажеров преимущественно представлены самоходные суда смешанного река–море плавания, относящиеся к четвертой группе.

Детализация судов четвертой группы, участвовавших в ТП за рассматриваемый период, приведена рис. 4.

Из диаграммы на рис. 4 видно, что 35% исследуемой группы (толкаемые составы и пассажирские суда) прак-

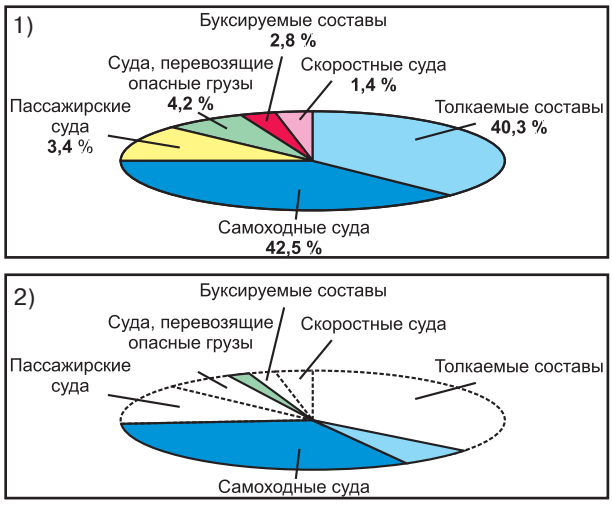

Рис. 2. Распределение типов судов, участвовавших в транспортных порисшествиях в период 2007-2009 годов (1) и моделируемых в навигационных тренажерах (2)

тически не моделируются в современных навигационных тренажерах, а значит судоводители в ходе тренажерной подготовки в принципе не могли отработать и закрепить навыки по управлению этими типами судов. Кроме того, необходимо учитывать, что ряд «толкаемых составов», относящихся к третьей и четвертой группам судов, по своим габаритным характеристикам (длина – более 200 м и ширина – свыше 30 м) превышают самоходные суда (средняя длина – 110 м и ширина – 13 м), входящие в состав БД тренажеров.

Таким образом, анализ первой группы критериев позволяет сделать вывод о существовании несоответствия моделируемых в тренажерах типов транспортных средств ВВТ с реальными типами судов, на которых непосредственно работает судоводитель, что в конечном итоге негативно сказывается на качестве тренажерной подготовки.

Чтобы провести оценку качества подготовки судоводитетельского состава на навигационных тренажерах по второй группе критериев, проведем сравнительный анализ основных участков ВВП РФ, имеющихся в БД навигационных тренажеров, производимых различными компаниями. Особый интерес представляют 2 категории:

2.1) судоходные участки ВВП, моделируемые в тренажерах;

2.2) судоходные участки ВВП, отсутствующие в БД тренажеров.

Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим акваторию Северо-Западного бассейна. Данный выбор продиктован следующими причинами:

– местные районы плавания реализованы в большинстве навигационных тренажеров УТЦ РФ [5];

– по количеству ТП на ВВП (в исследуемый период 2007-2009 годов) регион занимает второе место.

На рис. 5 отмечены места ТП в исследуемой акватории. Характерно, что аварии происходили как на участках, не входящих в БД тренажеров (красные метки), так и на участках, реализованных в тренажерах (зеленые метки). Соотношение протяженности участков Северо-Западного бассейна, моделируемых в БД навигационных тренажеров различных производителей, представлено на рис. 6.

Из рис.6 видно, что моделируются участки районов плавания протяженностью от 77 до 160 км при общей длине основного судового хода бассейна порядка 1300 км.

Экспертным путем было установлено, что даже полное моделирование водного бассейна не приведет к существенному снижению числа ТП, то есть затраты на разработку подробной модели его акватории не принесут экономического эффекта. Кроме того, существуют объективные ограничения по продолжительности курса тренажерной подготовки судоводителей: от 36 до 72 ч. Следовательно, наиболее целесообразно организовывать подготовку судоводителей на условно-реальном участке, который для каждого водного бассейна должен формироваться индивидуально (по отдельному техническому заданию).

В настоящее время отсутствуют методики обоснования выбора конкретных моделей навигационных тренажеров для подготовки судоводителей к эксплуатации судов в конкретных водных бассейнах. В то же время нет и серьезных оснований акцентировать внимание на тренажерах определенных

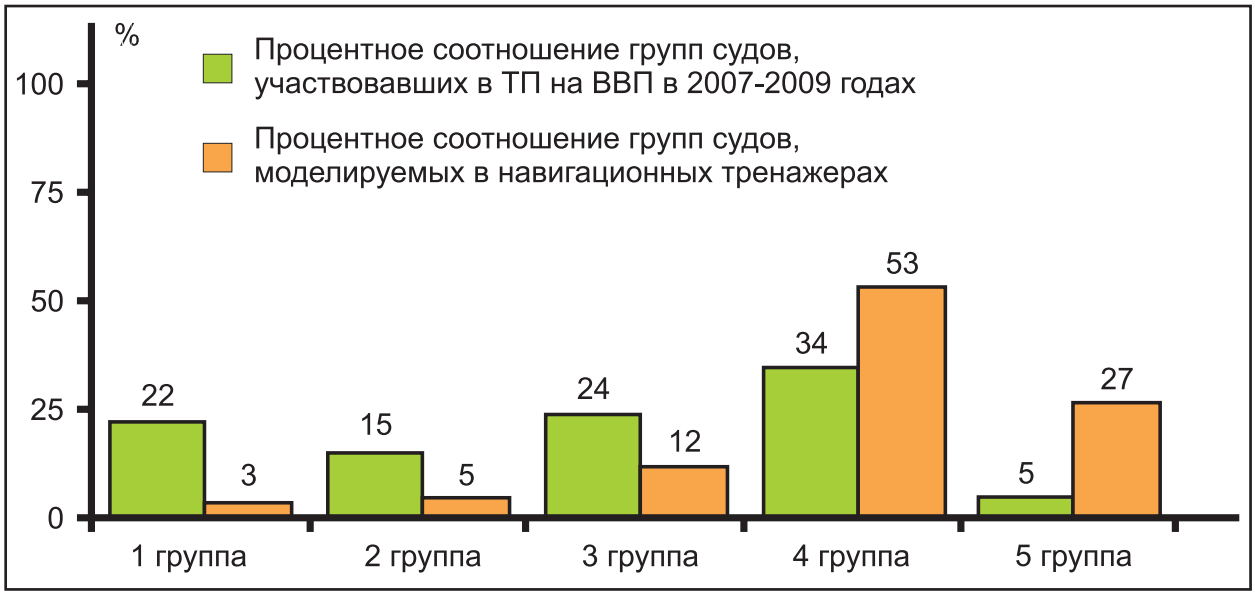

Рис. 3. Распределение судов по группам (в соответствии с мощностью главных двигателей), участвовавших в ТП в период 2007-2009 годов и моделируемых в навигационных тренажерах

производителей или обосновывать целесообразность уже закупленного в УТЦ оборудования.

Для формирования оптимальной программы подготовки судоводителей ВВТ аторами статьи предлагается следующий методический подход к количественной оценке эффективности навигационных тренажеров, а также методика выбора «оптимального тренажера» для подготовки судоводителей по трем категориям: тип судна, группа судна и водный бассейн.

Для этого введем коэффициенты полноты моделирования в соответствии с приведенными выше группами критериев для: типов судов, групп судов, водных бассейнов.

1.1. Коэффициент полноты моделирования типов судов конкретного тренажера ($К_{Т.С.}$):

$$К_{Т.С.} = \frac{n_ц \cdot \sum M_{Т.С.i}}{N_ц \cdot M_n}, \quad (1)$$

где $n_Ц$ – количество тренажеров конкретного производителя, используемых для подготовки плавсостава судов ВВТ на территории РФ;

$N_Ц$ – общее количество тренажеров, используемых для подготовки плавсостава судов ВВТ на территории РФ;

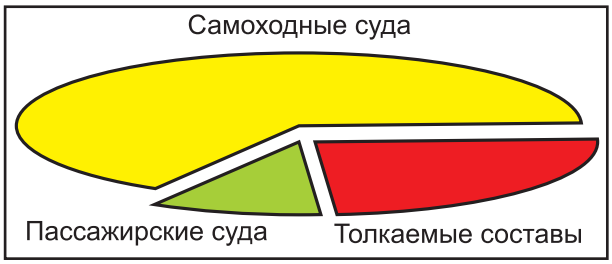

Рис. 4. Распределение типов судов четвертой группы, участвовавших в ТП в период 2007-2009 годов

$M_{Т.С.i}$ – количество активных судов i-го типа в БД конкретного тренажера;

M_n – общее число активных судов в БД конкретного n-го тренажера.

1.2. Обобщенный коэффициент полноты моделирования типов судов в навигационных тренажерах, используемых для подготовки судоводителей ВВТ ($К_{Об.\ Т.С.}$):

$$К_{Об.Т.С.} = \frac{\sum M_{О.Т.С.i}}{M_n}, \quad (2)$$

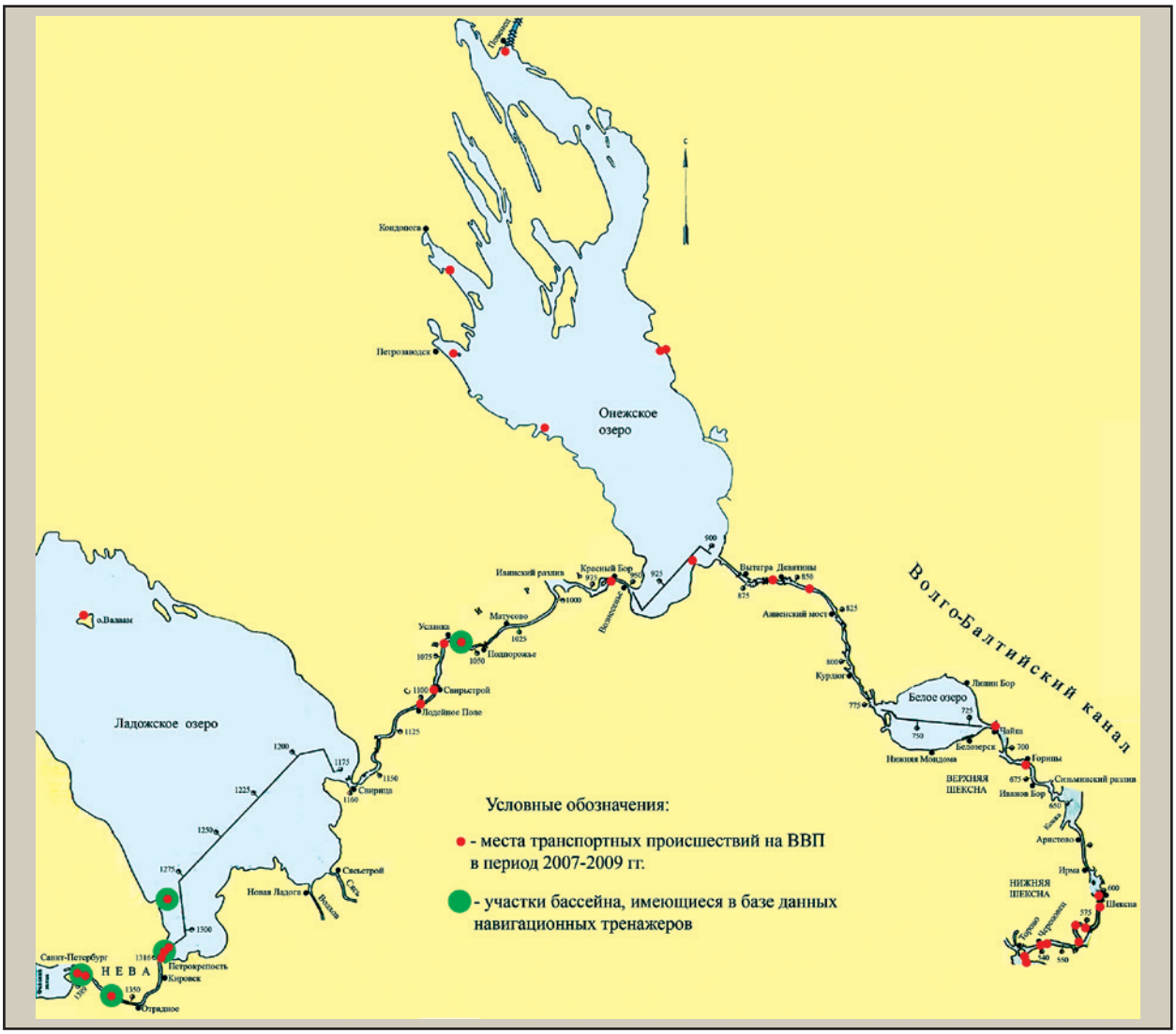

Рис. 5. Участки транспортных происшествий Северо-Западного бассейна и их имитация в применяемых навигационных тренажерах

где $M_{О.Т.С.i}$ – количество активных судов i-го типа в БД навигационных тренажеров, используемых для подготовки судоводителей ВВТ.

Пример 1. Рассчитаем $K_{Т.С.}$ толкаемых составов для тренажера «Riv.Sim. 2.5».

Исходные данные: $n_С$=4; $N_Ц$=37; $M_{Т.С.i}$=1; M_n=4, тогда:

$$К_{Т.С.} = \frac{4 \cdot 1}{37 \cdot 4} = \frac{4}{148} \approx 0{,}027 \approx 0{,}03.$$

Пример 2. Рассчитаем $K_{Т.С.}$ толкаемых составов для тренажера «МАСТЕР».

Исходные данные: $n_С$=5; $N_Ц$= 37; $M_{Т.С.i}$=2; M_n=8, тогда:

$$К_{Т.С.} = \frac{5 \cdot (1+1)}{37 \cdot 8} = \frac{10}{296} \approx 0{,}034 \approx 0{,}03.$$

2.1. Коэффициент полноты моделирования групп судов конкретного тренажера($K_{Г.С.}$):

$$К_{Г.С.} = \frac{n_ц \cdot \sum M_{Г.С.i}}{N_ц \cdot M_n}, \quad (3)$$

где $n_Ц$ – количество тренажеров конкретного производителя, используемых для подготовки плавсостава судов ВВТ на территории РФ;

$N_Ц$ – общее количество тренажеров, используемых для подготовки плавсостава судов ВВТ на территории РФ;

$M_{Г.С.i}$ – количество активных судов i-й группы в базе данных конкретного тренажера;

M_n – общее число активных судов в базе данных конкретного тренажера.

2.2. Обобщенный коэффициент полноты моделирования групп судов в навигационных тренажерах, используемых для подготовки судоводителей ВВТ ($K_{Об.Г.С.}$):

$$К_{Об.Г.С.} = \frac{\sum M_{О.Г.С.i}}{M_n}, \quad (4)$$

где $M_{О.Г.С.i}$ – количество активных судов i-го типа в БД навигационных тренажеров, используемых для подготовки судоводителей ВВТ.

Пример 3. Рассчитаем $K_{Г.С.}$ IV группы судов для тренажеров «NTPro-3000/4000».

Исходные данные: $n_Ц$ = 17; $N_Ц$ = 37; $M_{Г.С.IV}$ = 6; M_n = 7, тогда:

$$К_{Г.С.} = \frac{17 \cdot (1+1+1+1+1+1)}{37 \cdot 7} = \frac{102}{259} \approx 0{,}03938 \approx 0{,}039.$$

3.1. Коэффициент полноты моделирования водного бассейна конкретного тренажера ($K_{Бас.}$):

$$К_{Бас.} = \frac{n_ц \cdot \sum L_{Мод}}{N_ц \cdot L_{Бас.}}, \quad (5)$$

где $n_С$ – количество тренажеров конкретного производителя, используемых для подготовки плавсостава судов ВВТ на территории РФ;

$N_Ц$ – общее количество тренажеров, используемых для подготовки плавсостава судов ВВТ на территории РФ;

$L_{Мод.}$ – общая протяженность участков, рассматриваемого бассейна, в БД конкретного тренажера;

$L_{Бас.}$ – общая длина рассматриваемого водного бассейна.

3.2. Обобщенный коэффициент полноты моделирования конкретного водного бассейна в навигационных тренажерах, используемых для подготовки судоводителей ВВТ ($K_{О.Бас.}$):

$$К_{О.Бас.} = \frac{\sum L_{О.Мод}}{L_{Бас.}}, \quad (6)$$

где $L_{О.Мод.}$ – общая протяженность участков, рассматриваемого бассейна, в БД навигационных тренажеров, используемых для подготовки судоводителей ВВТ.

Применяя зависимости (1)-(6), рассчитаем коэффициенты полноты моделирования для навигационных тренажеров на основе информации публикаций [5, 6]. Полученные численные значения коэффициентов моделирования представлены в таблице.

Знание величин коэффициентов полноты моделирования позволит лицам, ответственным за подготовку судоводителей ВВТ, аргументированно подходить к выбору навигационных тренажеров для подготовки судоводителей по трем категориям: тип судна, группа судна и водный бассейн. Кроме того, эти коэффициенты можно использовать для косвенной оценки качества тренажерной подготовки в УТЦ на уже установленном оборудовании.

Предварительные расчеты по оценке качества тренажерной подготовки с использованием статистических данных о ТП на ВВП позволяют формулировать следующие рекомендации по формированию БД тренажеров:

– необходимо моделировать затруднительные участки с учетом специфики и статистических данных о ТП в конкретных водных бассейнах;

– для подготовки судоводительского состава целесообразно использовать несколько типовых участков ВВП с различными условиями плавания, характерными для конкретного водного бассейна или же для ВВП в целом, которые также могут объединяться в учебные полигоны;

– следует расширить номенклатуру типов активных судов в соответствии с эксплуатируемыми в конкретных водных бассейнах;

– предусмотреть возможность формирования различных видов составов и возможность подготовки специалистов на том типе и группе судов, на которых они работают.

В итоге формирование контента БД тренажеров сводится к решению

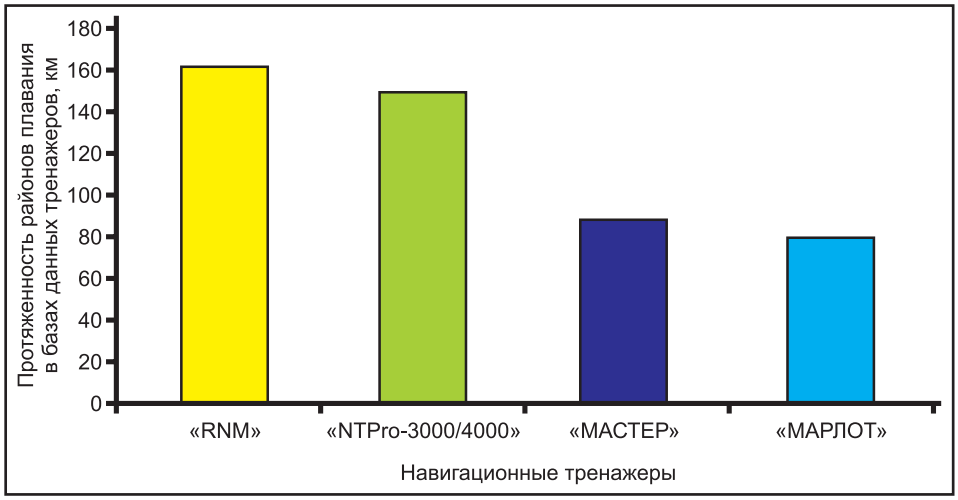

Рис. 6. Соотношение протяженности моделируемых районов плавания Северо-Западного бассейна в БД навигационных тренажеров

Коэффициенты полноты моделирования для навигационных тренажеров

	Навигационные тренажеры					
	«NTPro»	«МАРЛОТ»	«МАСТЕР»	«RNM»	«Riv.Sim. 2.5»	Общий
Коэффициенты полноты моделирования типов судов ($K_{Т.С.}$)						
Самоходные суда	0,46	0,19	0,105	0,11	0,08	0,78
Толкаемые составы	0	0	0,035	0	0,03	0,11
Буксируемые составы	0	0	0	0	0	0
Суда, перевозящие опасные грузы	0	0,05	0	0,05	0	0,11
Пассажирские суда	0	0	0	0	0	0
Скоростные суда	0	0	0	0	0	0
Коэффициенты полноты моделирования групп судов ($K_{Г.С.}$)						
Первая группа	0	0	0	0,05	0	0,07
Вторая группа	0	0	0	0	0,05	0,07
Третья группа	0	0	0,04	0	0,03	0,19
Четвертая группа	0,39	0,19	0,05	0,05	0,03	0,60
Пятая группа	0,06	0	0,02	0	0	0,07
Коэффициенты полноты моделирования бассейнов($K_{Бас.}$)*						
Азово-Донской бассейн	0,02	0	0	0	0	0,02
Волжский бассейн	0,03	0,003	0	0,00094	0	0,10
Камский бассейн	0	0	0	0	0	0
Северо-Западный бассейн	0,05	0,01	0,009	0,01	0	0,26
Центральный бассейн	0	0,02	0,008	0,0009	0	0,12

*При расчете коэффициента длина водного бассейна ($L_{Бас}$) принималась в соответствии с протяженностью ВВП, входящих в состав единой глубоководной системы европейской части РФ, и ВВП РФ международного значения.

многокритериальной оптимизационной задачи, которая в общем виде может представлена, как:

$$БД_{НТ} = \Psi(\bigcup_{\forall i} S_{зат.уч\,i}, \bigcup_{\forall i} M_{суд.бас.i}; S_{тип.уч}, M_{тип.суд.}; \bigcup_{\forall j} S_{уч.ТП\,j}, \bigcup_{\forall j} M_{суд.ТП\,j}) \to opt, \quad (7)$$

где $S_{зат.уч.\,i}$ – виды затруднительных участков в i-ом водном бассейне;

$M_{суд.бас.i}$ – типы и группы судов в i-м водном бассейне;

$S_{тип.уч.}$ – виды типовых участков ВВП РФ;

$M_{тип.\,суд.}$ – типы и группы судов, эксплуатируемых на ВВП РФ;

$Sy_{ч.ТП\,j}$ – виды участков j-го водного бассейна, на котором происходят ТП;

$M_{суд.ТП\,j}$ – типы и группы судов, участвовавших в ТП в j-м водном бассейне.

Для решения задачи (7) могут быть использованы методы, предложенные авторами в публикациях [7, 8].

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. Распоряжение Министерства транспорта РФ № 21 от 09.02.2000 г. **2.** Управление Государственного морского и речного надзора. URL: http://www.rostransnadzor.ru/sea/ (дата обращения: 08.02.2011). **3.** Положение о дипломировании членов экипажей судов внутреннего плавания – М.: «Альтаир», 2005 – 20 с. **4.** Иванов М.А. Исторический обзор отечественных тренажеров для подготовки судоводительского состава внутреннего водного транспорта // «Речной транспорт (XXI век)». – 2011. – № 2 (50) – С. 87-92. **5.** Иванов М.А. Обзор оснащенности учебно-тренажерных центров навигационными тренажерами для подготовки судоводителей судов внутреннего водного транспорта // «Речной транспорт (XXI век)». – 2011. – № 3 (51) – С. 80-85. **6.** Радиолокационный тренажер для внутренних водных путей РФ. Река Енисей. – Красноярск: «Инфокон», 2005, 26 с. **7.** Demchenkov O. SC-method of adaptation Marine navigational simulators for training river shipmasters. – в кн. Transport Systems and Processes. Marine navigation and Safety of sea transportation (TransNav'2011).- London: Taylor&Francis Group, 2011, pp.213-218. **8.** Демченков О.В., Иванов М.А. Метод оценки навигационных тренажеров для судоводителей. // Мир транспорта. – 2011. – № 3(Т. 36) – С. 140-145.

АННОТАЦИИ

Разработка стратегий замены транспортного флота / Кузьмичев И.К.// Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 46. Рассматриваются возможные варианты обновления транспортного флота за счет внутренних и заемных финансовых ресурсов. **Ключевые слова:** стратегия, транспортный флот. **Контактная информация: priemnaya@aqua.sci-nnov.ru**

Нормы Кодекса внутреннего водного транспорта в области качества перевозок грузов не действуют / Телегин А.И., Ничипорук А.О., Гончарова Н.В.// Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 48. Рассматриваются особенности современной нормативно-правовой базы в области перевозок грузов на внутреннем водном транспорте. **Ключевые слова:** нормативно-правовая база, перевозка грузов, внутренний водный транспорт. **Контактная информация: nichiporouk@rambler.ru**

Об одном методе расчета течений вязкой несжимаемой жидкости / Костин В.И. // Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 64. Рассматриваются вопросы численного моделирования течений неоднородной несжимаемой жидкости. Предлагается неявный алгоритм решения уравнений Навье-Стокса, основанный на применении компактных аппроксимаций третьего порядка точности как для конвективных, так и для диффузионных членов уравнений. Приводятся результаты расчётов. **Ключевые слова:** компактные аппроксимации, стратифицированная среда, несжимаемая жидкость. **Контактная информация: msawt@inbox.ru**

Мониторинг прочности металлоконструкций запорных гидравлических конструкций СГТС / Зайцев Е.А., Мещихин И.А.// Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 70. Предложена методика применения численных методов при организации прочностного мониторинга гидротехнических сооружений. На примере шлюзового затвора рассмотрены особенности учета эксплуатационных факторов при прочностном анализе сооружения, в качестве результатов которого представлены таблицы предельных состояний эксплуатационных параметров. **Ключевые слова:** анализ прочности, гидросооружения, мониторинг, эксплуатация. **Контактная информация: mefict@mail.ru**

Комплексное использование спутниковых и геоинформационных технологий на судах смешанного река–море плавания / Катенин В.А., Бойков А.В.// Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 74. Рассматриваются пути повышения навигационной безопасности за счет комплексного использования новых технологий в судовождении: спутниковых систем различного назначения и средств отображения разнородной информации на основе геоинформационных систем. **Ключевые слова:** навигационная безопасность, судовождение. **Контактная информация: boykovalexey@bk.ru**

Обоснование безопасной эксплуатации портальных кранов / Леонова О.В., Веретенников Е.Г., Смирнова А.С.// Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 78. Рассматриваются подходы к оценке риска эксплуатации портальных кранов с использованием комбинированного метода, основанного на анализе состояния элементов оборудования. **Ключевые слова:** оценка риска, портальный кран, безопасная эксплуатация. **Контактная информация: v.e.g@inbox.ru**

Методика оптимизации эксплуатационных показателей флота судоходной компании / Фомин В.Г., Карабутов П.Н.// Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 81. Описывается разработанная методика оптимизации эксплуатационных показателей работы флота судоходной компании (на базе Microsoft Excel). Дано ее применение для решения задачи минимизации эксплуатационных показателей судна при движении его по транспортной сети с использованием математической модели. **Ключевые слова:** методика, оптимизация, эксплуатационные показатели, флот. **Контактная информация: kn22@yandex.ru**

Параметрическое управление состоянием динамических систем водного транспорта / Саушев А.В.// Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 84. Рассматриваются методологические основы управления состоянием динамических систем (ДС) водного транспорта. Приводится определение и дается классификация различных видов категории состояния. С системных позиций исследуются задачи параметрического управления состоянием на различных этапах жизненного цикла ДС. Предлагается единый подход, основанный на информации о границе области работоспособности системы. **Ключевые слова:** управление состоянием, область работоспособности, запас работоспособности, структурный синтез, параметрический синтез, динамические системы. **Контактная информация: saushev@bk.ru**

Моделирование ожидаемых результатов оптимизации системы виброшумозащиты /Щербакова О.В., Романченко М.К.// Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 88. Рассматриваются винтовые цилиндрические пружины растяжения и сжатия. Рассчитываются их основные параметры, необходимые для моделирования оптимальной системы виброшумозащиты: собственная частота и устойчивость. **Ключевые слова:** собственная частота, пружина сжатия, пружина растяжения, устойчивость. **Контактная информация: rmk2010@mail.ru**

Сравнительный анализ качества тренажерной подготовки судоводительского состава судов внутреннего плавания / Иванов М.А., Демченков О.В.// Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 4 (52). – с. 90. Предлагается авторский подход к анализу качества тренажерной подготовки на основе данных о транспортных происшествиях на ВВП. Дано описание методики выбора «оптимального тренажера» для подготовки различных категорий судоводителей к управлению судами в конкретных водных бассейнах ВВП РФ. **Ключевые слова:** судоводители судов внутреннего водного транспорта, навигационный тренажер, транспортные происшествия, количественные оценки, полнота моделирования, «оптимальный тренажер». **Контактная информация: mivanovs@yandex.ru**