

ВІСНИК



ОДЕСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО
УНІВЕРСИТЕТУ

20

Міністерство освіти і науки України



ВІСНИК

**ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

Збірник наукових праць

ВИПУСК 20

Заснований у 1998 році

Одеса – 2006

УДК 629.12.002(082)

ББК 39.42-011я43

В635

Вісник Одеського національного морського університету: Збірник наукових праць. – Випуск 20. – Одеса: ОНМУ, 2006. – 195 с. Українською, російською та англійською мовами.

Збірник містить роботи по актуальним проблемам теорії корабля, проектування, сучасних та перспективних типів суден та їх силового устаткування, морським шляхам і портам, питанням управління роботою морського транспорту у сучасних умовах.

Сборник содержит работы по актуальным проблемам теории корабля, проектирования современных и перспективных типов судов и их силовых установок, морским путям и портам, вопросам управления работой морского транспорта в современных условиях.

The issue holds the collection of works on up-dated problems of: theory of ships, designing of modern and forthcoming types of vessels, ship machinery, sea routes and seaport, actual problems of merchant marine maintenance under existing economical condition.

Редакційна колегія:

д-р техн. наук, проф. **Ю.Л. Воробйов** – відп. редактор,
д-р техн. наук, проф. **Шумлянський І.Ф.** – заст. відп. редактора,
д-р техн. наук, проф. **Ананьїна В.З.**, д-р техн. наук, проф. **Вассерман О.А.**,
д-р техн. наук, проф. **Гришин В.О.**, д-р техн. наук, проф. **Дубровський М.П.**,
д-р техн. наук, проф. **Євдокімов В.Д.**, д-р техн. наук, проф. **Жуков Ю.Д.**,
д-р техн. наук, проф. **Івановський В.Г.**, д-р техн. наук, проф. **Каганов Я.І.**,
д-р техн. наук, проф. **Клованич С.Ф.**, д-р техн. наук, проф. **Козляков В.В.**,
д-р техн. наук, проф. **Козирев В.К.**, д-р екон. наук, проф. **Лапкіна І.О.**,
д-р екон. наук, проф. **Махуренко Г.С.**, д-р екон. наук, проф. **Морозова І.В.**,
д-р техн. наук, проф. **Олійник М.В.**, д-р техн. наук, проф. **Панарін П.Я.**,
д-р техн. наук, проф. **Пойзнер М.Б.**, д-р екон. наук, проф. **Постан М.Я.**,
д-р техн. наук, проф. **Сизов В.Г.**, д-р екон. наук, проф. **Чекаловець В.І.**,
д-р екон. наук, проф. **Якушенко В.Г.**, д-р техн. наук, проф. **Яровенко В.О.**,
Силакова Г.І. – відп. секретар.

Друкується за ухвалою Вченої ради
Одеського національного морського університету
від 01.06.2006 р. (протокол № 9)

УДК 629.12.523.5.073

Ю.Л. Воробьев
М.Б. Косой

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА В ПОЛОСЕ ФИКСИРОВАННОЙ ШИРИНЫ ПРИ ВЕТРЕ И ВОЛНЕНИИ

Приведен пример практического использования понятия полосы движения судна (ПДС) в качестве обобщённой характеристики управляемости для оценки безопасности плавания судна в условиях штормового ветра и волнения.

Ключевые слова: управляемость, обеспеченность движения судна в полосе, спектральные характеристики ветра и волнения.

В работах [6] и [7] получено теоретическое решение задачи об оценке обеспеченности факта невыхода судна, совершающего управляемое движение в условиях штормового ветра и волнения, за пределы полосы движения фиксированной ширины. В настоящей работе теоретическое решение реализовано для конкретного сухогрузного судна среднего тоннажа на подходе к Одесскому морскому торговому порту. К расчёту принято судно, рассмотренное в примере №1 «Приложения» к книге Г.В. Соболева [8]. Главные размерения и некоторые характеристики судна приведены в таблице 1.

Таблица 1

Главные размерения и характеристики расчётного судна

| <i>Наименование характеристики</i> | <i>Обозначение</i> | <i>Размерность</i> | <i>Величина</i> |
|---|----------------------|--------------------|-----------------|
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| <i>Длина судна между перпендикулярами</i> | <i>L</i> | <i>м</i> | <i>160,9</i> |
| <i>Ширина судна по действующую ватерлинию</i> | <i>B</i> | <i>м</i> | <i>23,2</i> |
| <i>Осадка судна на миделе</i> | <i>T</i> | <i>м</i> | <i>7,5</i> |
| <i>Осадка судна носом</i> | <i>T_н</i> | <i>м</i> | <i>6,9</i> |
| <i>Осадка судна кормой</i> | <i>T_к</i> | <i>м</i> | <i>8,1</i> |
| <i>Коэффициент общей полноты</i> | <i>C_b</i> | <i>–</i> | <i>0,59</i> |
| <i>Коэффициент полноты мидельшпангоута</i> | <i>C_т</i> | <i>–</i> | <i>0,98</i> |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|------------|--------|-------|
| Площадь руля и рудерпоста, соответствующая T_k | F_{p+pn} | m^2 | 28,5 |
| Абсцисса центра парусности | x_n | m | -37 |
| Длина надстройки | l_n | m | 20 |
| Высота надстройки | h_n | m | 12 |
| Время перекладки руля с $\delta = -35^\circ$ до $\delta = 35^\circ$ | T_n | c | 28,0 |
| Максимальная скорость судна | v_{max} | m/c | 11,6 |
| Мощность на валу при v_{max} | N_{max} | $л.с.$ | 19250 |
| Число винтов (рулей) | Σ_a | - | 1 (1) |
| Диаметр гребного винта | D_a | m | 6,7 |
| Шаговое отношение винта | H/D_a | - | 1,04 |
| Дисковое отношение винта | A/A_a | - | 0,56 |

Предполагается, что судно движется вдоль прямолинейной полосы фиксированной ширины (например, вдоль подходного канала к порту) при заданных ветро-волновых условиях под управлением автоматизированной системы (авторулевой) с заданным (оптимальным) законом управления. Координаты судна и параметры его движения в начальный момент времени являются детерминированными величинами. Движение судна рассматривается как случайный процесс и необходимо определить обеспеченность события невыхода судна за границы полосы по прохождении заданной дистанции. Согласно [6] и [7] вероятность «невыхода» судна за границы полосы фиксированной ширины можно определить, зная совместную плотность распределения вероятности параметров движения судна. Эта плотность удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова с начальными и граничными условиями

$$\begin{cases}
 \frac{\partial}{\partial t} p(\bar{X}, t) = -\sum_j^N \frac{\partial}{\partial X_j} [\alpha_j(t) p(\bar{X}, t)] + \frac{1}{2} \sum_{g,h}^N \frac{\partial^2}{\partial X_g \partial X_h} [\beta_{gh}(t) p(\bar{X}, t)], \\
 p(\bar{X}, t_0) = \prod_j^N \delta(X_j(t) - X_j^0); \\
 p(\bar{X}, t) = \prod_j^N \delta(X_j(t) - X_j^r(t)).
 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\bar{X}(t)$ – случайный векторный процесс, компонентами которого являются переменные системы управляемого движения судна (см. (2) в [7]) и их производные; $\alpha_j(t)$ и $\beta_{gh}(t)$ – коэффициенты сноса и диффузии процесса, X_j^0 – значения компонент вектора $\bar{X}(t)$ в начальный момент времени, X_j^r – значения компонент вектора $\bar{X}(t)$ на границе области D . Коэффициенты $\dot{\alpha}_j(t)$ и $\dot{\beta}_{gh}(t)$, которые представляют собой математические ожидания и совместные корреляции компонент процесса $\bar{X}(t)$, полностью определяются из упомянутой выше системы (2) в [7] при известных гидро- и аэродинамических характеристиках корпуса судна и спектральных характеристиках внешних возмущений.

Коэффициенты гидродинамических сил, возникающих на корпусе судна, пере руля и гребном винте, а также поправки, учитывающие взаимное влияние элементов гидродинамического комплекса «корпус – руль – гребной винт» были определены в соответствии с рекомендациями [8].

Определение возмущающих сил и моментов выполнено в соответствии с результатами исследований, приведенными в работе [1]. Формулы для определения поперечной гидродинамической силы и F_2 момента рыскания F_6 записываются так:

$$F = i\sigma\rho \exp(i\sigma t) \cdot \left(\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial n} - \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) r d\alpha dz; \quad j = 2; 6, \quad (2)$$

где $\Phi_j(r, \alpha, z, t)$ – потенциалы излучения при поперечных колебаниях ($j=2$) и рыскании ($j=6$); $\Phi_0(r, \alpha, z, t)$ – потенциал набегающего морского волнения, представленный в подвижной системе цилиндрических координат выражением

$$\Phi_j(r, \alpha, z, t) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} i \frac{g}{\sigma} \frac{ch k(z-H)}{ch k H} \exp\{i(\sigma t - rk \cos(\varepsilon - \alpha))\} d'G(\sigma, \varepsilon). \quad (3)$$

Так как потенциал $\Phi_0(r, \alpha, z, t)$ является стационарным в широком смысле случайным процессом, спектральные плотности возмущающих силы и момента определяются по теореме Хинчина

$$S_j = \left| W^{\Phi_0 \rightarrow F_j} \right|^2 S_{\Phi_0}; \quad S_{\Phi_0} = - \left(\frac{g}{\sigma_0} \right)^2 S_{\zeta}; \quad j = 2; 6, \quad (4)$$

где S_{ϕ_0} – спектральная плотность потенциала Φ_0 , S_{ζ} – спектральная плотность волновой поверхности, которая определена в работе [2] в результате статистической обработки данных натуральных наблюдений за волнением в Одесском заливе. Функция S_{ζ} допускает дробно-рациональное представление

$$S_{\zeta}(\sigma) = D_{\zeta} \sum_{i=1}^2 \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\beta + (-1)^{i-1} \sigma)^2}. \quad (5)$$

Дисперсия волнения D_{ζ} , входящая в это выражение, связана со средней высотой волн \bar{h} соотношением

$$D_{\zeta} = \bar{h}^2 / 2\pi. \quad (6)$$

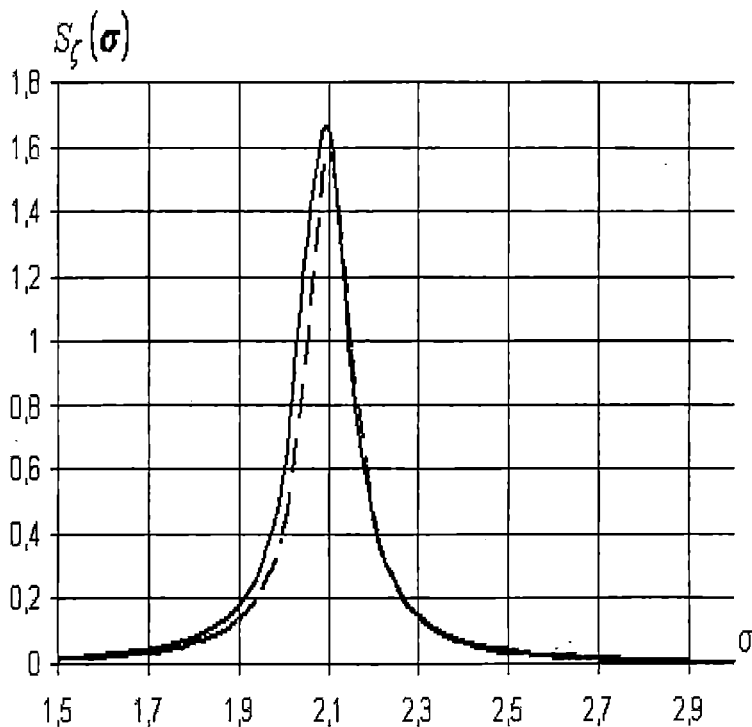


Рис.1. Графики спектральных плотностей волнения:
 • сплошная кривая построена по данным 2000 г.,
 • пунктирная – по данным 2001г.

Значения параметров α и β , полученных для двух выборок, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры спектральной плотности волновых аппликат

| Период | α | β |
|-----------|----------|---------|
| Зима 2000 | 0,162 | 2,18 |
| Зима 2001 | 0,157 | 2,37 |

Графики зависимости спектральной плотности от частот волнения $S_\varepsilon(\sigma)$, полученные по данным наблюдений зимой 2000 и 2001 годов, приведены на рис. 1. Потенциалы излучения $\Phi_j(r, \alpha, z, t)$, $j = 2; 6$, необходимые для определения сил (3), найдены в [1] на основе применения специально разработанного для решения волновых задач судовой гидродинамики метода сращиваемых асимптотических разложений (САР). Гидродинамические силы F_j , $j = 2; 6$ и их передаточные функции $W^{\Phi_0 \rightarrow F_j}$ определяются по формулам

$$F_j = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\alpha_0 - \frac{\pi}{2}}^{\alpha_0 + \frac{\pi}{2}} \sin(\varepsilon - \alpha) [R_{sj} + iR_{cj}] \exp\{i\sigma t\} d^2 G(\sigma, \varepsilon); \quad (7)$$

$$W^{\Phi_0 \rightarrow F_j} = \frac{1}{2} \sin(\varepsilon - \alpha) [R_{sj} + iR_{cj}] \exp\{i\sigma t\}; \quad j = 2; 6.$$

Графики передаточных функций $W^{\Phi_0 \rightarrow F_2}$ и $W^{\Phi_0 \rightarrow F_6}$ представлены на рис. 2.

Для того, чтобы можно было воспользоваться методикой, изложенной в работах [6] и [7], квадраты модулей передаточных функций

$$\left| W^{\zeta \rightarrow F_j} \right|^2 = \left(\frac{g}{\sigma} \right)^2 \left| W^{\Phi_0 \rightarrow F_j} \right|^2$$

были аппроксимированы дробно-рациональными выражениями, представленными в таблице 3.

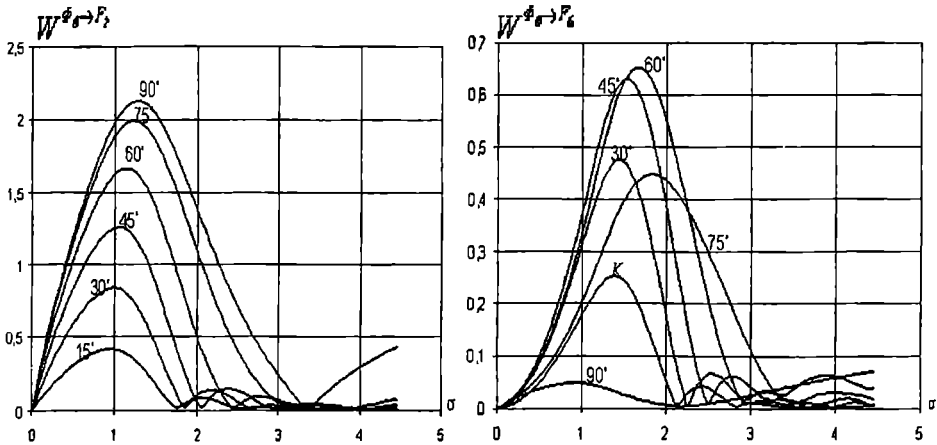


Рис. 2. Передаточные функции гидродинамической силы F_2 и момента F_6 для разных направлений распространения волнения

Таблица 3

Выражения аппроксимаций квадратов передаточных функций гидродинамических сил и моментов для различны

| Направление волн α | Аппроксимации $ W^{\zeta \rightarrow F_6} ^2$ | Аппроксимации $ W^{\zeta \rightarrow F_2} ^2$ |
|---------------------------|---|---|
| 15° | $\frac{1,15\sigma^2 + 0,12}{2,85\sigma^8 - 10,22\sigma^2 + 37,12}$ | $\frac{9,98\sigma^2 + 4,09}{31,94\sigma^8 - 8,89\sigma^6 + 34,23\sigma^2 + 5,23}$ |
| 30° | $\frac{0,46\sigma^2 + 0,05}{0,27\sigma^8 - 1,24\sigma^2 + 4,82}$ | $\frac{10,47\sigma^2 + 4,08}{6,76\sigma^8 - 1,75\sigma^6 + 9,23\sigma^2 + 1,38}$ |
| 45° | $\frac{0,28\sigma^2 + 0,032}{0,072\sigma^8 - 0,45\sigma^2 + 2,08}$ | $\frac{194,12\sigma^2 + 68,66}{38,75\sigma^8 - 7,14\sigma^6 + 80,19\sigma^2 + 11,77}$ |
| 60° | $\frac{0,6\sigma^2 + 0,075}{0,095\sigma^8 - 0,8\sigma^2 + 5,32}$ | $\frac{33187\sigma^2 + 10224}{22,68\sigma^8 + 1,46\sigma^6 + 84,61\sigma^2 + 11,67}$ |
| 75° | $\frac{0,2\sigma^2 + 0,056}{0,042\sigma^8 - 0,41\sigma^2 + 5,12}$ | $\frac{8,38\sigma^2 + 2,23}{0,22\sigma^8 + 0,16\sigma^6 + 1,61\sigma^2 + 0,2}$ |
| 90° | $\frac{0,089\sigma^2 + 0,03}{18,56\sigma^8 + 21,43\sigma^2 + 2,09}$ | $\frac{7,86\sigma^2 + 1,64}{0,12\sigma^8 + 0,18\sigma^6 + 1,37\sigma^2 + 0,17}$ |

Аэродинамическая поперечная сила F_w и момент рыскания M_w представлены в виде сумм детерминированной и флуктуирующей компонент и рассчитываются по формулам

$$F_w = \frac{\rho_w S_y C_y}{2} \left[(u_{cp}^k)^2 + 2u_{cp}^k u_f^k \right], \quad M_w = \frac{\rho_w S_y L C_m}{2} \left[(u_{cp}^k)^2 + 2u_{cp}^k u_f^k \right], \quad (8)$$

где u_{cp}^k – средняя скорость кажущегося ветра, а $u_f^k = (u_s^k - u_{cp}^k)$ – флуктуирующая составляющая скорости ветра. Зависимость аэродинамических коэффициентов C_y и C_m от угла набегания ветра γ , определяемого по формуле

$$\gamma = \gamma_0 - \vartheta + \varphi_0 - \varphi, \quad (9)$$

представлена на рис.3.

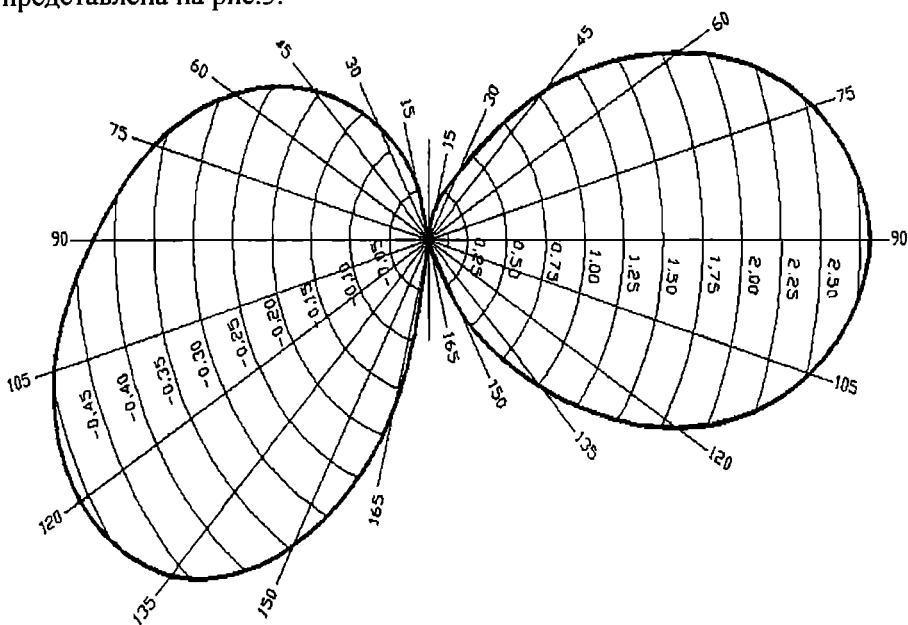


Рис.3. Распределение аэродинамических коэффициентов по направлениям ветра. В правой части диаграммы показана полярная диаграмма распределения коэффициента силы C_y , в левой полярная диаграмма коэффициента момента C_m

Выражение (9) следует из рассмотрения схемы действия ветровых нагрузок, приведённой на рис. 4. На этом рисунке γ_0 – генеральное направление истинного ветра, θ – угол между направлениями кажущегося и истинного ветра.

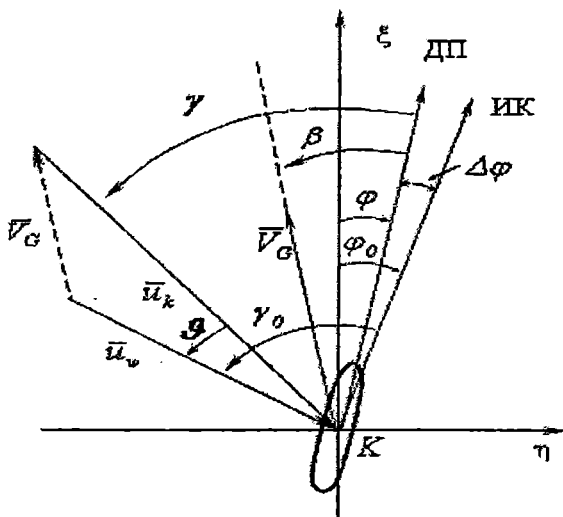


Рис. 4. Схема действия ветровых нагрузок на судно

Детерминированная составляющая аэродинамических сил входит в систему уравнений управляемости и служит для определения параметров установившегося движения судна, в частности φ_0 . Так как флуктуирующие составляющие аэродинамических сил являются линейными преобразованиями флуктуирующей компоненты скорости ветра, то, согласно теореме Хинчина, спектральные плотности аэродинамических силы F_w и момента M_w определяется по следующим формулам:

$$S_F = |W^{u_f \rightarrow F_w}|^2 S_{u_f^k}; \quad S_M = |W^{u_f \rightarrow M_w}|^2 S_{u_f^k}, \quad (10)$$

где $W^{u_f \rightarrow F_w}$ и $W^{u_f \rightarrow M_w}$ – передаточные функции аэродинамической силы и момента, которые равны

$$W^{u_f \rightarrow F_w} = \rho_w S_y C_y u_{cp}^k u_f^k; \quad W^{u_f \rightarrow M_w} = \rho_w S_y L C_m u_{cp}^k u_f^k. \quad (11)$$

Спектральная плотность флуктуирующей компоненты скорости ветра $S_{u_f^k}$ определена в работе [3] и допускает дробно-рациональное представление

$$S_{u_f^k} = \frac{3,21\sigma^2}{1,88\sigma^4 + 5,9\sigma^2 + 0,5}. \quad (12)$$

Вернёмся теперь к краевой задаче (1), описываемой уравнением Фоккера-Планка-Колмогорова с начальными и граничными условиями

относительно случайного векторного процесса $\bar{X}(t)$, компонентами которого являются переменные системы управляемого движения судна и их производные. Применение метода нормальной аппроксимации позволяет, не решая прямо краевую задачу, получить решение в виде условной нормальной плотности совместного распределения вероятности компонент вектора $\bar{X}(t)$

$$p(\bar{X}(t)) = \left[\sqrt{(2\pi)^n |\mathfrak{R}(t)|} \right]^{-1} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N B_{ij}(t) \frac{(\alpha_i(t) - X_i(t))(\alpha_j(t) - X_j(t))}{\sigma_i(t)\sigma_j(t)} \right\}. \quad (13)$$

Здесь $B_{ij}(t)$ – алгебраическое дополнение элемента $\beta_{ij}(t)$ ковариационной матрицы $\mathfrak{R}(t)$ вектора $\bar{X}(t)$, $|\mathfrak{R}(t)|$ – определитель этой матрицы, а $\sigma_i = \sqrt{\beta_{ii}}$ – среднеквадратические отклонения значений компоненты $X_i(t)$ вектора $\bar{X}(t)$. Задача в итоге сводится к определению первых и вторых моментов компонент $X_i(t)$ вектора $\bar{X}(t)$ и некоторых их произведений. Совместная плотность вероятности последовательности векторных процессов $\{\bar{X}(t_j)\}$ равна

$$p(\bar{X}_0, t_0; \bar{X}_1, t_1; \dots; \bar{X}_T, t_T) = \prod_{j=1}^{T-1} p(\bar{X}_{j+1}, t_{j+1} | \bar{X}_j, t_j) \times p(\bar{X}_0, t_0). \quad (14)$$

причём условные вероятности $p(\bar{X}_{j+1}, t_{j+1} | \bar{X}_j, t_j)$ определяются из решения задачи (1), если принять в качестве начального момента времени t_j и задать начальные значения математических ожиданий $\alpha_i(t_j)$ переменными величинами, а вторые моменты $\beta_{kl}(t_j)$ равными нулю. Учитывая опыт проводки судов по подходным каналам, можно наложить следующие ограничения на интервал изменения значений φ_j , η_j и их первых производных

$$|\varphi_j| \leq 0,4; \quad |\dot{\varphi}_j| \leq 0,1; \quad |\eta_j| < b_n - b - \left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) |\varphi_j|; \quad \left| \frac{d\eta}{dt} \right| \leq 0,3. \quad (15)$$

В соответствии с введёнными выше обозначениями совместную вероятность для последовательности событий невыхода судна за границы фиксированной полосы можно определить из следующего выражения:

$$P\left(\left|X_l^0\right| \leq \varphi_{\max}, \left|X_{l+1}^0\right| \leq \eta_{\max}, t_0; \dots; \left|X_l^T\right| \leq \varphi_{\max}, \left|X_{l+1}^T\right| \leq \eta_{\max}, t_T\right) =$$

$$= \int_{-\Gamma}^{\Gamma} p\left(\bar{X}_0, t_0; \bar{X}_1, t_1; \dots; \bar{X}_T, t_T\right) \prod_{l=0}^T \prod_{j=1}^N dX_j^l; \quad (16)$$

$$l = m_2 + m_6 + m_u + 1.$$

Здесь Γ – предел интегрирования, равный φ_{\max} для X_l^i , η_{\max} для X_{l+1}^i и бесконечности для остальных компонент векторов $\bar{X}(t_i)$; верхний индекс в X_j^i указывает на принадлежность вектору $\bar{X}(t_i)$, соответствующему i -му моменту времени, нижний – на порядковый номер компонента в этом векторе.

Для устойчивого движения судна можно указать верхнюю оценку вероятности P события «невыход судна за границу фиксированной полосы» с помощью неравенства Чебышева

$$P\left(\left|\left(\frac{1}{2} - x_f\right)\varphi + \eta\right| \geq \frac{|b_n - b|}{2}\right) < 4 \frac{\left(\left(\frac{1}{2} - x_f\right)\sigma_\varphi + \sigma_\eta\right)^2}{(b_n - b)^2}, \quad (17)$$

где $b = \frac{B}{L}$; x_f абсцисса центра тяжести ватерлинии; φ – курсовой угол

судна; η – поперечное смещение судна; $\sigma_\varphi = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_\varphi(\sigma) d\sigma}$ – средне-

квадратическое отклонение курсового угла; $\sigma_\eta = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_\eta(\sigma) d\sigma}$ – сред-

неквадратическое поперечное смещение; $b_n = \frac{B_n}{L}$ – отнесённая к длине

судна ширина фиксированной полосы. Это неравенство не требует громоздких вычислений. Оно удобно для быстрой оценки возможности безопасной проводки судна.

С целью получения систематизированной информации об условиях «невыхода» конкретного расчётного судна за границы фиксированной полосы, были проведены массовые расчёты для различных сочетаний входных параметров. Скорость судна V_G принималась

равной 3 м/с и 5 м/с , а скорость ветра $u_w - 15\text{ м/с}$, 20 м/с и 25 м/с для 13 направлений от 15° до 165° через 15° . Ширина полосы B_n принималась равной 3 и 5 ширинам судна. Дистанция движения судна по полосе составляла 10, 25 и 50 его длин. Для развитого под действием устойчивого ветра волнения, при отсутствии в волновом поле волн зыби средняя высота волны \bar{h} связана с основными факторами волнообразования следующим эмпирическим соотношением [4]:

$$\frac{g\bar{h}}{u_w^2} = 1,5 \times 10^{-3} \left(\frac{gL_R}{u_w^2} \right)^{0.43}, \quad (18)$$

где L_R – это протяжённость воздушного потока над водной поверхностью, называемая разгоном ветра, принятая равной 500 м. Глубина акватории взята равной двум осадкам судна. Результаты расчётов обеспеченности $Q = 1 - P$ события «невыхода судна за границу фиксированной полосы» представлены в виде полярных диаграмм. Полярная диаграмма строится для фиксированных значений скорости судна V_G и скорости ветра u_w . Лучи, исходящие из начала координат, соответствуют различным направлениям ветра, а семейство концентрических окружностей – различным значениям обеспеченности Q . На каждой полярной диаграмме нанесены две группы кривых. Группе, отмеченной цифрой 1, соответствует ширина полосы $B_n = 3B$, а группе, отмеченной цифрой 2 – ширина полосы $B_n = 5B$. В каждой группе сплошная кривая соответствует дистанции $L_n = 10L$ движения судна до его вероятного выхода за границу фиксированной полосы, кривая с треугольным маркером – дистанции $L_n = 25L$, а кривая с прямоугольным маркером – дистанции $L_n = 50L$. Полярные диаграммы, изображенные на рис. 5, 6, 7 построенные для скорости хода судна $V_G = 3\text{ м/с}$ при трёх значениях скорости ветра: рис. 5 $u_w = 15\text{ м/с}$, рис. 6 $u_w = 20\text{ м/с}$, рис. 7 $u_w = 25\text{ м/с}$. На рис. 8, 9, 10 приведены полярные диаграммы для скорости хода судна $V_G = 5\text{ м/с}$ при тех же значениях скорости ветра: рис. 8 $u_w = 15\text{ м/с}$, рис. 9 $u_w = 20\text{ м/с}$, рис. 10 $u_w = 25\text{ м/с}$.

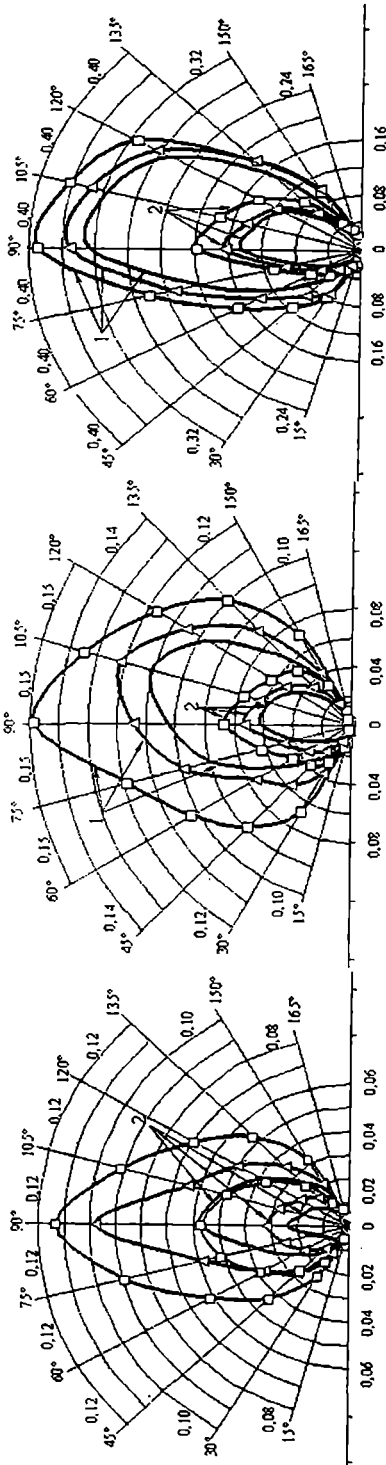


Рис. 5

Рис. 6

Рис. 7

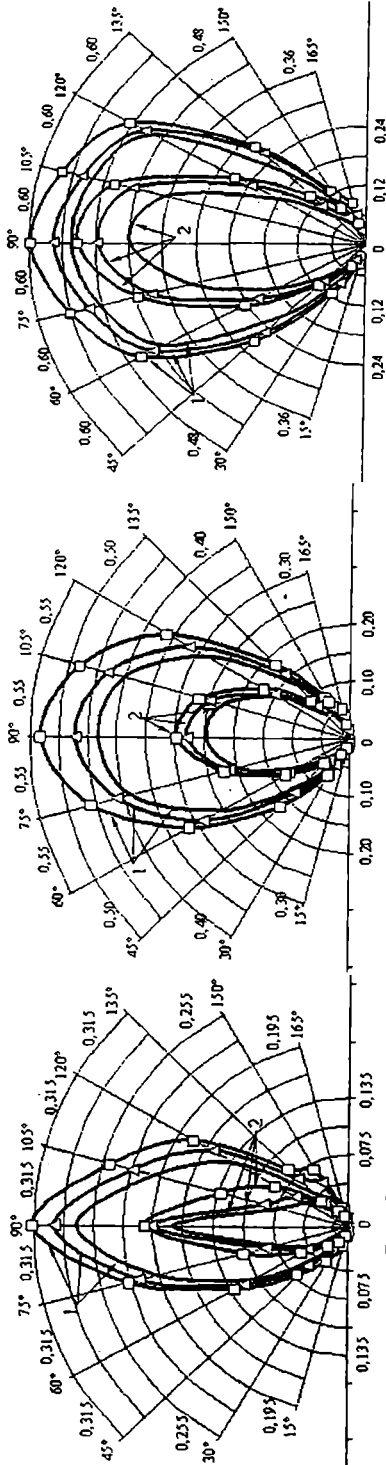


Рис. 8

Рис. 9

Рис. 10

Рис. 5-10. Полярные диаграммы обеспеченности «невыхода» судна за пределы ПДС

Анализ результатов показал, что на величину обеспеченности Q «невыхода» судна за пределы фиксированной полосы оказывают влияние все отмеченные выше факторы. Особенно заметным оказывается влияние направления скорости ветра. Уменьшение отношения скоростей $\frac{V_G}{u_w}$ ведёт к неравномерному росту величины обеспеченности, но при разных скоростях ветра и судна, но равных отношениях $\frac{V_G}{u_w}$ значения обеспеченности близки. Из приведённого примера ясно, что величина Q представляет собой новый интегральный критерий оценки уровня безопасности плавания судна в сложных гидрометеорологических и навигационных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьёв Ю.Л. Гидродинамика судна в стеснённом фарватере. Л.: Судостроение, 1992. – 224 с.
2. Воробьёв Ю.Л., Косой М.Б., Романадзе Д.Д. Спектральные характеристики морского волнения в районе Одесского залива // Вісник ОНМУ. Вид-во ОНМУ. – 2002. – № 8. – С. 24-38.
3. Воробьёв Ю.Л., Косой М.Б. Спектральные характеристики ветра в Одесском заливе // Вісник ОНМУ. Вид-во ОНМУ. – 2002. – № 9. – С. 3-15.
4. Давидан И.И., Лопатухин Л.И., Рожков. В.А. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. Л.: Гидрометиздат, 1978. – 287 с.
5. Косой М.Б. Методика расчёта аэродинамических характеристик надводной части корпуса транспортных судов // Вісник ОНМУ. Вид-во ОНМУ. – 2003. – № 11. – С. 90-106.
6. Косой М.Б. Вероятность сохранения фиксированной ширины полосы движения судна при действии ветра и волнения // Вісник ОНМУ. Вид-во ОНМУ. – 2004. – № 13. – С. 23-42.
7. Косой М.Б. Практическое определение ширины полосы движения заданной обеспеченности, занимаемой судном в условиях ветра и волнения // Вісник ОНМУ. Вид-во ОНМУ. – 2004. – № 14. – С. 20-31.
8. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. Л.: Судостроение, 1976. – 477 с.

Надійшла 11.05.06

О НЕОБХОДИМОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОЧНОСТИ КОРПУСОВ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО И СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ

С позиций теории риска обоснованы изменения нормативных требований к стандарту общей и местной прочности судов внутреннего и смешанного река-море плавания.

Ключевые слова: общая прочность, местная прочность, риск, безопасность, суда внутреннего плавания, суда смешанного река-море плавания.

ВВЕДЕНИЕ

Правила Российского Речного Регистра (РРР) в соответствии с действующим соглашением с Регистром судоходства Украины (РУ) являются нормативной базой для проектирования, постройки и наблюдения в эксплуатации судов внутреннего и смешанного река море – плавания судов (СВВП и ССП) под флагом Украины.

За последние пять лет нормативная база РРР была подвергнута значительным изменениям, связанным с необходимостью обеспечить надлежащий организационно-правовой статус, учесть действующее законодательство государства, с выделением государственных технических требований – регламентов и собственно классификационных требований общества из текста ранее действовавших Правил.

Особо следует отметить разработку и введение принципиально важных для поддержания надлежащего уровня безопасности и эффективности флота нормативных документов:

- нового издания Правил РРР 2002 года [1];
- руководства «Обновление судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания» [2];
- руководства «Строительство судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания с использованием элементов эксплуатировавшихся судов» [3];
- руководства по обновлению судов технического флота [4].

Разрабатываются новые требования РРР к судам – газовозам, сточным судам, новым районам плавания самых различных классов, что позволяет РРР и РУ занять активную позицию именно в тех направлениях, которые наиболее востребованы или могут быть востребованы в ближайшее время на рынке классификационных услуг.

При разработке Правил были учтены многие поправки и предложения, которые вносили различные организации, включая РУ, Морское Инженерное Бюро, а также требования международных нормативных документов, в том числе международных конвенций.

Вместе с тем, анализ и опыт применения Правил РРР выявил весьма серьезные проблемы в части конкурентоспособности Правил РРР по отношению к Правилам Российского морского Регистра судоходства (РС), выразившихся в уходе значительной части судов из класса РРР в класс РС. Всего за период с 1991 года по 2006 год поменяли класс 479 судов, в том числе сухогрузные и нефтеналивные суда, буксиры и толкачи, несамостоятельные баржи.

Целью статьи является определение основных путей обеспечения рационального конкурентоспособного стандарта прочности СВВП и ССП, исходя из анализа опасностей, вызывающих повреждения корпусов.

Во многом, проблемы с относительно увеличенной металлоемкостью СВВП и ССП определяются применяемыми в Правилах РРР подходами к нормированию общей и местной прочности корпусов судов внутреннего и смешанного река-море плавания, которые де-факто приводят к относительному увеличению металлоемкости корпусов для близких по районам судов с классом РС.

Понятно, что обратной стороной вопроса является обеспечение надежности судов, безопасности людей и защиты окружающей среды.

Собственно говоря, основная проблема создания и эксплуатации СВВП и ССП состоит именно в обоснованном выборе рациональной технической стратегии сочетания эксплуатационных ограничений и экономических преимуществ, нахождения «золотой» середины между требованиями приемлемой надежности, безопасности с одной стороны и экономической эффективности с другой стороны в течение всего жизненного цикла судна.

Следует ясно понимать, что, несмотря на все заявления о том, что человеческая жизнь бесценна, реальные объекты выполняют свои основные функции в рамках ограниченных ресурсов, в том числе и на обеспечение безопасности.

Поэтому в сфере морских исследований был предложен метод формализованной оценки безопасности (ФОБ).

ФОБ – системный интегрированный подход к обеспечению безопасности на море, который включает в себя защиту человеческой жизни, окружающей среды и техники на основе формализованных методов оценки риска и технико-экономического анализа. ФОБ рекомендован Международной Морской Организации (ИМО) [5] как метод получения новых норм безопасности на море с целью достижения оптимального баланса различных технических и эксплуатационных факторов, в том числе человеческого, нахождения «золотой» середины между безопасностью и затратами на ее обеспечение.

Ранее такой анализ базировался на интуитивной оценке вероятностей и последствий аварий, и установлении экономически обоснованного риска, неявно заложенного в требования правил.

Соответственно, любое судно внутреннего и смешанного река-море плавания¹ – это объект с ограниченной и контролируемой надежностью, безопасность которого обеспечивается дополнительными организационно-техническими мероприятиями – ограничениями по районам, сезонам, условиям плавания.

Упомянутое обстоятельство существенно повышает необходимость адекватного учета риска на всех стадиях жизненного цикла и, особенно, на стадии эксплуатации, модернизации и т.п.

Действительно, в подобных случаях мы имеем дело со стоимостной составляющей, которая во многом определяется влиянием человеческого фактора, причем не только при нарушении границ допускаемых районов плавания и погодных ограничений, но и, что особенно важно, на этапе нормирования.

Например, общая прочность корпусов исследуемых судов в Правилах регламентируется с учетом возможной ошибки прогноза погоды. При этом в нормативы неявно закладывается заданный процент потери ходового времени на ожидание соответствующих погодных условий, определяемый без каких-либо технических или экономических обоснований. Последний фактор, несомненно, имеет исключительно экономическую природу и может быть определен только с учетом фактора риска. Сейчас же назначение данной величины является действием, во многом, субъективным.

В случае, когда определены варианты контроля риска, затраты на реализацию которых меньше, чем величина риска в зоне «ALARP» (допустимого уровня риска для данной стадии развития общества), соответствующие мероприятия закладываются в нормативы ИМО, государств и классификационных обществ, после чего они являются обязательными для исполнения.

Такой подход позволяет классификационному обществу четко мотивировать принятие тех или иных норм проектирования и эксплуатации судов, при условии достаточности и достоверности данных по авариям и их последствиям.

Исследование тяжелых повреждений вплоть до перелома корпусов СВВП и ССП является обширной базой для применения методов теории риска, т.к. информация об авариях судов редко бывает полностью достоверной и исчерпывающей, а иногда отсутствует совсем. Поэтому необходимо формировать совокупность возможных сценариев (деревьев) событий, влиявших на аварию и анализировать их методами теории риска. Используя

¹ Корпуса всех судов в той или иной степени обладают ограниченной надежностью, но СВВП и ССП имеют относительно меньший стандарт прочности по сравнению с судами неограниченного района плавания.

полученные результаты по отдельным случаям, можно сформулировать мероприятия по снижению риска при эксплуатации существующих судов, а также требования к нормативам для проектируемых судов.

В таком применении метод ФОБ позволяет решить три взаимосвязанные задачи:

1. Многофакторный анализ конкретного происшествия.
2. Оценка риска существующих типов судов с принятием организационно-технических мер по его снижению на основе анализа конкретных ситуаций.
3. **Корректировка или создание нормативов** для проектирования новых судов на базе оценки риска существующих.

Таким образом, анализ нормативов должен начинаться с анализа риска и установления опасностей, которые приводят к нарушению прочности. Нормативы являются инструментом воздействия на риск и должны создаваться с учетом реальных частот воздействия и последствий воздействия выявленных опасностей.

1. АНАЛИЗ РИСКА ПЕРЕЛОМОВ КОРПУСОВ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ. ГЛАВНЫЕ ФАКТОРЫ ОПАСНОСТИ

Принципиальным вопросом, связанным с анализом переломов корпусов СВВП, является выявление факторов – опасностей, их вызывающих. Именно выявление главных факторов позволяет создать такие нормативы, которые будут обеспечивать фактическую надежность корпусов по отношению к реально подтвержденным в результате анализа риска опасностям.

Согласно [6] наибольшее число переломов имеют корпуса сухогрузных самоходных судов (60-70%). Самоходные наливные суда имеют около 20% от общего числа переломов.

Вероятность перелома самоходного СВВП в 4,5-5 раз выше аналогичной вероятности для самоходного СВВП (в основном, как показал анализ, за счет неправильно организованных грузовых операций).

Как следует из аварийной статистики, более 98% переломов корпусов отечественных самоходных СВВП происходили на тихой воде – при грузовых операциях, при посадке на мель, при затоплении отсеков, при проведении ремонта кормовой оконечности.

Обработка данных по переломам СВВП, эксплуатировавшихся на ВВП СССР (России и Украины), позволила автору в работе [7] получить вероятности перелома их корпусов $p_{ав}$ в зависимости от воздействовавшей опасности за год – см. табл. 1.

Можно заметить, что вероятность перелома СВВП для опасностей: посадки на мель и обсыхания, а также ремонтных операций мало зависит от типа судна.

Другое дело – ошибки во время грузовых операций. Эта опасность играет принципиальную и определяющую роль именно у несамходных СВПП, где уровень контроля над проведением погрузки/выгрузки существенно ниже, приняты относительно меньшие запасы прочности и достигается относительно больший уровень эксплуатационных повреждений, чем у самоходных судов.

Таблица 1

Вероятность $P_{ав}$ перелома корпуса СВВП, эксплуатировавшихся на ВВП СССР

| Опасность | Сухогрузные несамходные | Наливные несамходные | Самходные грузовые |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| Грузовые операции | 0,00683 | 0,00649 | 0,00041 |
| Посадки на мель и обсыхание | 0,00191 | 0,00300 | 0,00104 |
| Затопление отсеков | 0,00100 | 0,00077 | |
| Ремонтные операции | 0,00073 | 0,00077 | 0,00032 |
| Волнение | 0,00018 | | 0,00053 |

В табл. 2 определена вероятность перелома корпусов СВВП системы Дунай-Майн-Рейн (ДМР) $p_{ав}$ в зависимости от воздействовавшей опасности за год [7].

Таблица 2

Условная вероятность $p_{ав}$ перелома корпуса СВВП системы ДМР

| Опасность | Несамходные грузовые | Самходные грузовые |
|-----------------------------|----------------------|--------------------|
| Грузовые операции | 0,00650 | 0,00041 |
| Посадки на мель и обсыхание | 0,00100 | 0,00100 |
| Затопление отсеков | 0,00090 | |
| Ремонтные операции | 0,00080 | 0,00030 |

По рекомендации работы [6] примем в качестве оценки допустимого уровня аварийности (переломов) по отдельным разделам $[p_{ав}] = 0,00100$ (это соответствует 1 перелому на 1000 судов, находящихся в эксплуатации за год или 1 перелом на 30 судов за 35 лет эксплуатации).

Вероятность перелома самоходных грузовых судов находится на допустимом уровне аварийности $[p_{ав}]$, причем главную опасность представляют посадки на мель и выморозка.

Для самоходных судов ситуация более сложная. Такие опасности, как посадка на мель, затопление отсеков, ошибки во время ремонтных операций, имеют вероятности аварийного воздействия на уровне (или несколько ниже) принятого допустимого уровня аварийности. Зато частота переломов во время грузовых операций в 6,8 раз превышающую граничную величину $[p_{ав}] = 0,00100$.

Из табл. 1 следует, что за год на 1000 самоходных сухогрузных СВВП происходят 6,8 переломов или 1 перелом на 147 судов во время грузовых операций. При нормальной интенсивности эксплуатации самоходное судно за 1 год проходит 30-50 операций погрузки и выгрузки. Таким образом, в среднем на 4500-7400 операций в порту приходится 1 перелом корпуса.

За 10 лет эксплуатации самоходное СВВП имеет около 300-500 погрузок и выгрузок, а за условный срок службы в 35 лет – 1050-1750 операций. Следовательно, частота встречи с опасными последствиями неправильно организованных (экстремальных) операций весьма высока, что приводит к 1 перелому во время грузовых операций на 3-7 самоходных судна за 35 лет службы.

За год на 1000 самоходных СВВП происходят 6,8 переломов или 1 перелом на 147 судов во время грузовых операций. При нормальной интенсивности эксплуатации самоходное судно за 1 год проходит 30-50 операций погрузки и выгрузки. Таким образом, в среднем на 4500-7400 операций в порту приходится 1 перелом корпуса.

Для судов, работавших на ВВП бывшего СССР, на рис. 1 и для судов системы ДМР на рис. 2 для каждой опасности был определен обобщенный уровень риска R в виде произведения вероятности возникновения опасности P на последствия воздействия указанной опасности на объект C (уровень последствий). Результаты были представлены в виде матриц риска.

Условная вероятность P оценивалась по 5-балльной шкале («1» – вероятность перелома 0-0,0049 в год, «2» – 0,0050-0,0075, «3» – 0,0076-0,00100, «4» – 0,00101-0,00200, «5» – 0,00201 и выше). C также оценивался по 5-балльной шкале согласно классификации табл. 3.

Для самоходных СВВП бывшего СССР риск велик при грузовых операциях, при посадке на мель и выморозках, при нарушении непроницаемости отсеков, что полностью согласуется с выводами, ранее полученными в работах О.И. Свечникова [6].

Следуя рекомендациям ИМО и Международного комитета по конструкции судов, уровень риска сухогрузных и наливных самоходных судов при грузовых операциях и наливных самоходных судов при посадке на мель можно признать «недопустимым», прочие опасности находятся в пределах минимально допустимого практически уровня риска («ALARP»).

Наибольшую опасность для несамостоятельных СВВП представляют плохо организованные грузовые операции.

Для самостоятельных грузовых судов наибольший риск возникает при посадке на мель (для исследуемых условий речь идет о посадке на мель с ходу и при выморозках).

Ранжирование исследованных опасностей (см. матрицы риска на рис. 1 и рис. 2) для корпусов СВВП позволяет составить следующий их список в порядке значимости:

1. Грузовые операции.
2. Посадки на мель.
3. Затопление отсеков.
4. Ремонтные операции.

Именно эти опасности и приводят, как правило, к переломам корпусов СВВП.

Волновая составляющая для СВВП играет де-факто совсем незначительную роль, а де-юре в расчетах и нормативах роль дополнительного запаса прочности.

Поэтому анализ риска переломов СВВП позволяет сделать следующие выводы:

1. Стандарт прочности корпусов СВВП следует определять с учетом «непроектных» воздействий, перечисленных выше, и особенностей эксплуатации судов на внутренних водных путях, пересмотрев главенствующую роль волновой составляющей.

2. Переработать нормативы местной прочности корпусов СВВП, введя в качестве основных «эксплуатационные» нагрузки от грейферов, падения кусков груза, швартовок, контактов с грунтом на мелководье, стенками шлюзов, каналов, причалов.

2. АНАЛИЗ РИСКА АВАРИЙ КОРПУСОВ СУДОВ ОГРАНИЧЕННОГО ПЛАВАНИЯ. ГЛАВНЫЕ ФАКТОРЫ ОПАСНОСТИ

Данные об авариях и аварийных происшествиях с отечественными судами ограниченного района плавания (СОРП), выходящими в море, до 1990 года мало публиковались и не подвергались систематическому анализу.

В разделе приведен анализ происшедших с 1991 года по 2002 год аварий с корпусами морских и смешанного плавания СОРП, находящихся под контролем судовладельцев России и Украины [8].

Всего автору удалось получить сведения о 71 аварии и инциденте с СОРП, находившихся под надзором различных классификационных обществах (КО). Данные суда имели ограничения по величине высоты волны 3% обеспеченности $h_{3\%}$ от 2,0 до 8,5 м.

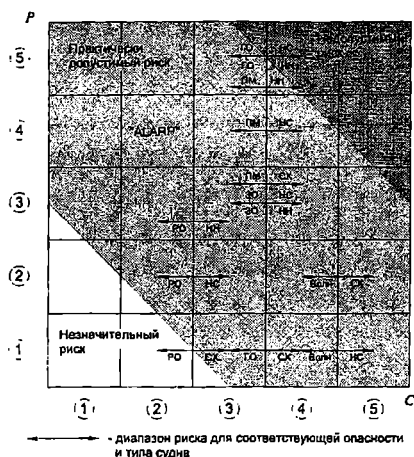
Обращает на себя внимание тот факт, что наиболее доступны сведения о незначительных инцидентах, которые часто выясняются на стадии изучения актов дефектации корпусов в ходе выполнения расчетов фактической прочности, и о катастрофах, которые стали доступны благодаря средствам массовой информации и вмешательству администраций портов и флагов. Случаи с промежуточными уровнями последствия, которые могли подорвать репутацию судовладельцев, последними, как правило, не обнародовались. По этой же причине, в настоящей работе не приводятся названия судов, кроме уже названных в других публикациях.

В табл. 3 дана предложенная автором краткая классификация основных групп идентифицированных опасностей, имеющих значение для исследования надежности и безопасности СОП.

Таблица 3

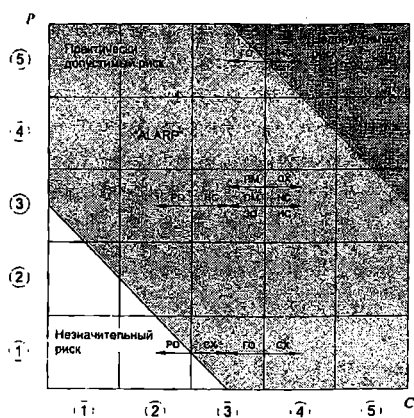
Рассмотренные аварии и аварийные ситуации с СОП в море

| Уровень последствий C_J | Количество рассмотренных происшествий и катастроф | Степень повреждения | | |
|------------------------------|---|---|---------------------------------|---------------------------------|
| | | Воздействие на людей | Воздействие на окружающую среду | Повреждение технических средств |
| 1 – Light Incident | 30 | Нет | Нет | Ничтожное |
| 2 – Incident | 14 | Легкое телесное повреждение | Ничтожное | Незначительное |
| 3 – Casualty | 4 | Серьезное, необратимое телесное повреждение | Существенное | Серьезное |
| 4 – Serious Casualty | 4 | Потеря человеческой жизни | Критическое | Значительное |
| 5 – Very Serious Casualty | 19 | Много человеческих жертв | Катастрофическое | Гибель судна |



ГО – грузовые операции;
 ПМ – посадка на мель;
 ЗО – затопление отсеков;
 Волн – волновые нагрузки;
 РО – ремонтные операции.
 СХ – самоходные суда (все типы);
 НС – несамоходные суда;
 НН – нефтеналивные суда.

Рис. 1. Матрица риска для корпусов СВВП бывшего СССР



ГО – грузовые операции;
 ПМ – посадка на мель;
 ЗО – затопление отсеков;
 Волн – волновые нагрузки;
 РО – ремонтные операции.
 СХ – самоходные суда;
 НС – несамоходные суда.

Рис. 2. Матрица риска для корпусов СВВП системы ДМР

Ежегодная вероятность катастрофы с СОРП за 1991-2002 гг. составляет примерно $23/(1000 \cdot 11) = 0,002$, что ниже среднемирового уровня для судов торгового флота. Данная оценка может быть признана достаточно достоверной, т.к. случаи с уровнем последствий $C_j = 4$ и $C_j = 5$ скрыть крайне сложно.

Ежегодная вероятность аварий и аварийных происшествий с СОРП за 1991-2002 гг. составляет приблизительно $71/(1000 \cdot 11) = 0,006$. Однако, имеющиеся в распоряжении автора данные по случаям с уровнями последствия $C_j = 1$, $C_j = 2$ и $C_j = 3$ нельзя признать полными. Фактически эта величина должна быть существенно выше, в пределах 0,04-0,08. По экспертным оценкам, на судах бывшего СССР ежегодная вероятность аварий составляла около 0,04. Обращает на себя внимание, что ряд опасностей имеет $F_{\text{КАТ}} > F_{\text{АВ}}$, что свидетельствует об их значительной роли в увеличении степени тяжести последствий событий.

Обобщенные данные в табл. 4 сформированы на основании обработки аварий и аварийных происшествий.

Среди них водотечность (явная) непроницаемых конструкций (опасность 1.2) и близкие к ней по сути опасность 1.8 – невыполнение условий МК-66 (т.е. потенциальная водотечность), опасность 2.1 – перевозка металлолома и опасность 3.8 – перегруз судна. СОРП работают в тяжелых условиях мелководья и частых шлюзований (до 30 в одном рейсе) летом и в ледовой обстановке зимой, что повышает весомость опасности 3.5, т.к. она в силу накопления деформационных повреждений и истирания наружной обшивки снижает несущую способность корпусов судов. СОРП в связи с их пониженным стандартом прочности, имеют меньшие запасы прочности, чем аналогичные суда неограниченного района плавания. Поэтому все факторы, приводящие к запроектному росту усилий на тихой воде и на волнении – опасности 3.2, 3.6, 3.7, 3.8 – отражаются на тяжести последствий воздействия на корпус СОРП этих опасностей.

Все из рассмотренных 71 случая были проанализированы на основе тех данных, которые имелись в распоряжении автора, а также с помощью математического моделирования разных сценариев развития событий путем построения деревьев отказов и деревьев событий.

По каждой i -ой опасности указан по 3-бальной шкале коэффициент относительной ответственности (весомости) B_{ij} в рассматриваемом j -ом случае. По результатам исследования методами теории риска каждого происшествия назначались: $B_{ij} = 3$ – опасность прямого действия, непосредственно приведшая к аварии; $B_{ij} = 2$ – опасность косвенного действия, вызвавшая к жизни опасности с баллом «3»; $B_{ij} = 1$ – фоновые опасности, оказавшие неблагоприятное воздействие на ситуацию.

В рамках ФОБ для каждой опасности оценивался обобщенный условный уровень риска СОРП R , который определялся как произведение условной вероятности возникновения опасности P и ее условных последствий для объекта C .

Балл условной вероятности P определялся по 5-бальной шкале в зависимости от частоты возникновения в рассмотренных ситуациях ($P = 1$ при $F_{\text{КАТ}}$ или $F_{\text{АВ}} = 0-20\%$, $P = 2$ – 21-40%, $P = 3$ – 41-60%, $P = 4$ – 61-80%, $P = 5$ – 81-100%).

Условный уровень последствий C определялся по формулам для аварийных ситуаций

$$C = \frac{1}{N_I} \sum_{j=1}^{N_{\text{АВ}}} \frac{B_{ij}}{3} C_j$$

и для катастроф

$$C = \frac{1}{N_I} \sum_{j=1}^{N_{\text{КАТ}}} \frac{B_{ij}}{3} C_j.$$

На рис. 3 представлена формализованная оценка риска в виде матрицы риска, полученная на основе всех рассмотренных аварийных катастроф.



Рис. 3. Матрица риска СОПЭ, полученная для катастроф

Анализ рис. 3 позволяет сделать следующие выводы о ранжировании опасностей:

- наибольшую опасность для СОПЭ представляют степень соответствия МК-66, состояние и конструкция люковых закрытий, комингов дверей, вентиляторов и прочих отверстий в непроницаемой корпусе (опасность 1.8), существующий уровень риска по данной опасности относится к «недопустимому»;

- опасности 1.2 (фактическим обеспечением непроницаемости корпусных конструкций) и 2.1 (перевозка металлолома) имеет достаточно высокий формальный уровень риска как по частоте, так и по последствиям, который находится в т.н. зоне «ALARP», т.е. в пределах минимально допустимого практически уровня риска;

- опасности 1.1 (несоответствие технологий речного судостроения), 2.3 (применение грейферов), 3.9 (смена судовладельца) относятся к зоне «ALARP» за счет высокой частоты возникновения;

- опасности 3.2 (нарушение ограничений) и 3.7 (ошибка прогнозов) относятся к зоне «ALARP» за счет тяжести последствий.

Согласно подходов, принятых в методе ФОБ, опасности, которые отнесены по уровню риска к зоне «недопустимого риска», должны быть подвергнуты процедуре управления риском (снижения частоты и/или последствий) при любом уровне затрат, требуемых для этого. Опасности из

зоны «ALARP» требуют проведения технико-экономического анализа, с определением оптимальных по стоимости мероприятий для снижения уровня риска.

Таблица 4

Идентифицированные опасности для СОП

| № | Опасности | F_{AB} % | $F_{КАТ}$ % |
|-----|---|---------------|----------------|
| 1 | Опасности, связанные с техническим состоянием корпуса, машин, механизмов и систем судна | 83 | 87 |
| 1.1 | Несоответствие технологий, уровня качества и допускаемых дефектов речного судостроения требованиям для морской эксплуатации. | 69 | 78 |
| 1.2 | Водотечность наружной обшивки, настила второго дна, обшивки второго борта, обшивки поперечных переборок, стенок цистерн. | 34 | 61 |
| 1.3 | Нарушение технологии при выполнении ремонтных и модернизационных работ. | 39 | 35 |
| 1.4 | Пропуски дефектов при дефектации корпуса. | 24 | 35 |
| 1.5 | Ошибки проектировщиков. | 23 | 39 |
| 1.6 | Выход из строя главного двигателя, гребного вала, гребного винта, обесточивание. | 13 | 17 |
| 1.7 | Большие объемы замен корпусных конструкций при ремонте. | 19 | 13 |
| 1.8 | Невыполнение требований международной конвенции по грузовой марке (МК-66) в отношении люковых крышек, комингсов и конструкций воздушных труб, вентиляторов, непроницаемых дверей. | 32 | 61 |
| 1.9 | Удифферентовка для осмотра винта, баллера руля. | 1 | - |
| 2 | Опасности, связанные с нарушениями технологии перевозки груза | 72 | 78 |
| 2.1 | Перевозка металлолома. | 25 | 48 |
| 2.2 | Перевозка взрывоопасных грузов. | 3 | 9 |
| 2.3 | Грузовые операции с применением грейферов, тяжелых погрузчиков и бульдозеров. | 65 | 65 |
| 2.4 | Нарушение порядка погрузки/выгрузки в порту, инструкций по загрузке, «Наставления по креплению грузов». | 7 | 4 |
| 3 | Опасности, связанные с действиями судовладельца, береговых операторов и экипажа | 77 | 100 |
| 3.1 | Балластировка, не соответствующая указаниями инструкции по балластировке. | 8 | 9 |

| № | Опасности | F_{AB} % | $F_{КАТ}$ % |
|-----|--|---------------|----------------|
| 3.2 | Сознательное нарушение установленных ограничений по району, сезону плавания. | 32 | 35 |
| 3.3 | Сознательные и кратковременные посадки на мель, выморозка. | 11 | 9 |
| 3.4 | Навигационные ошибки. | 20 | 13 |
| 3.5 | Контакт с льдом, контакт со стенками причалов и шлюзов. | 15 | 22 |
| 3.6 | Смена балласта в море. | 3 | 9 |
| 3.7 | Ошибка прогноза. | 31 | 52 |
| 3.8 | Перегруз судна. | 7 | 17 |
| 3.9 | Смена судовладельца. | 44 | 65 |

Решение задачи управления риском СОРП при воздействии опасности 1.8 лежит в сфере организационно-технических мероприятий на стадии переклассификации речных судов и при освидетельствованиях действующих СОРП путем подкрепления или замены люковых закрытий, подъема высот комингсов водонепроницаемых дверей, вентиляторов, воздушных труб до уровня требований МК-66.

Анализ риска не подтверждает опасения о недостаточности прочности корпусов СОРП в морских условиях.

Подавляющее большинство опасностей является различными сторонами проявления человеческого фактора.

Как известно, значительная часть судов (пр. 1743, 1743.1, 19620, 19620А, 19620М, 191, 2-95, 2-95А/В, 326, 326.1, 92-13/040, 1577, 550А, 05074М, 05074А, 507Б, 1565, 621, 621.1, Р77 и др.), построенных по Правилам и под надзором РРР, имевших классы «М-СП», «М-ПР», «О-ПР», «М», перешли под наблюдение других классификационных обществ, в первую очередь РС, с существенным изменением (повышением) класса (вплоть до I ограниченного) с увеличением района плавания и допускаемой высоты волны.

Эксплуатация этих судов подтвердила достаточную надежность и приемлемые запасы прочности, заложенные при проектировании под класс РРР, в условиях, существенно более жестких, чем проектные.

По сути, во многом транспортный флот России, составляют именно эти суда.

Основываясь на таком масштабном натурном эксперименте, о котором ученые в прежние времена могли только мечтать, можно сделать вывод о достаточности коэффициентов запаса, заложенных при проектировании этих судов по требованиям РРР.

Сравнительный анализ Правил РРР и РС показывает, что требования к стандарту прочности класса М-СП 3,5 выше требования класса-аналога РС ШСП (при допускаемой высоте 3% обеспеченности волны

3,5 м) и несколько ниже класса ПСП (при допускаемой высоте 3% обеспеченности волны 6,0 м), что позволило РС ввести специальный класс ПСП (при допускаемой высоте 3% обеспеченности волны 4,5 м), который позволяет работать в районах плавания, соответствующих ПСП (что существенно превышает возможности М-СП).

Подобная ситуация возникает с классом М-ПР 2,5, требования к которому равноценны требованиям к стандарту прочности для судов ПСП (при допускаемой высоте 3% обеспеченности волны 3,5 м).

В результате, созданы предпосылки для ухода из класса РРР не только судов с классом М-СП (что происходило в течении 90-х годов), но и судов с более низкими классами М-ПР и О-ПР, что подрывает доходную часть бюджета РРР и перспективы строительства судов смешанного плавания под классы РРР.

Для решения выявленных проблем предлагается найти «золотую середину» между требованиями надежности и экономичности при обеспечении приемлемого уровня безопасности, включая:

1. Уточнение требований к стандарту общей прочности для судов смешанного плавания, основываясь на анализе требований других КО, анализе металлоемкости и конкурентоспособности Правил.

2. Сбалансировать требования к стандарту общей прочности Правил с требованиями, изложенными в Правилах освидетельствования судов в эксплуатации (ПОСЭ), Руководствах РРР [2, 3]. При этом принять за базу Руководство [3].

Определение технического состояния корпуса выполняется согласно формулы 3.1 Приложения 1 ПОСЭ 2002 года издания $M_{пр} \geq K_{годн} \cdot M_{расч}$, где $K_{годн}$ – нормативное значение коэффициента запаса прочности, определяемое по табл. 3.3. Например, для класса «М-СП» $K_{годн} = 1,27$. В Правилах РРР 1995 года издания величина $K_{годн}$ в зависимости наличия нагрузки на верхнюю палубу и напряжений в днище в предельном состоянии изменялась от 1,27 до 1,36 для нефтеналивных судов, а для сухогрузных судов – от 1,30 до 1,39.

Может показаться, что требования 2002 года стали мягче, чем в 1995 году. Однако, в соответствии с п. 3.2 ПОСЭ 2002 года предельный момент корпуса судна для связей, несущих местную нагрузку, должен быть умножен на коэффициент 0,9. Данное требование эквивалентно увеличению коэффициента $K_{годн}$ до величины $1,27 / 0,9 = 1,41$.

При выполнении процедуры обновления корпуса в соответствии с [2] значения нормативных коэффициентов запаса прочности должны быть увеличены по сравнению с регламентируемыми ПОСЭ на 10% для уровня обновления У1 и на 5% для уровня обновления У2.

Отсюда значения нормативных коэффициентов запаса прочности при обновлении составят $K_{годн} = 1,41 \cdot 1,10 = 1,55$ для уровня обновления

$У1$ и $K_{\text{годн}} = 1,41 \cdot 1,05 = 1,48$ для уровня обновления $У1$.

При этом значения коэффициента запаса по предельному моменту не превышают 1,50 для нового корпуса.

Напротив, при использовании Руководства [3] значения коэффициента запаса прочности по предельному моменту не превышают 1,45 для 4КС (нормативный срок службы судна 20 лет) и 1,40 для 3КС (нормативный срок службы судна 15 лет).

Таким образом, фактически требования ПОСЭ для судна в эксплуатации оказываются в ряде случаев выше требований Руководства [3] для новых судов 3КС, а требования к обновлению на уровень $У2$ выше требований для судов 4КС. Требования к обновлению на уровень $У1$ могут превосходить требования к новому корпусу.

Налицо несогласованность различных нормативных документов в столь серьезном вопросе, как стандарт общей прочности.

3. Разработать единые требования к определению волнового изгибающего момента для СВВП и ССП, которые в ныне действующих Правилах различны.

4. Исключить линейное суммирование напряжений от общего и местного изгиба при выполнении проверочных расчетов прочности. От подобного суммирования как неоправданно жесткого и противоречащего физике исследуемых процессов для морских судов отказались уже более тридцати лет назад.

При этом допускаемые напряжения от местного изгиба поставить в зависимости от запасов общей прочности.

5. Установить в Правилах четкую зависимость стандарта общей прочности судна к концу срока службы к аналогичным требованиям на стадии проектирования, так как сейчас такой зависимости нет и суда, формально спроектированные по требованиям Правил могут также формально уже через пять лет не отвечать требованиям ПОСЭ.

6. Разработать критерий эксплуатационной усталостной прочности для ССП, так как опыт показывает, что для корпусов ССП большую опасность представляет не разрушение при однократном нагружении на экстремальном волнении, а образование усталостных трещин в условиях эксплуатационного волнения.

7. Уточнить минимальные толщины и стандарт прочности в зависимости от срока службы, что позволит проектировать суда на заданный срок службы (10, 15, 20 лет).

8. Сбалансировать требования к местной прочности Правил с требованиями новых судов и судов в эксплуатации.

9. Ввести класс М-СП 4,5, который позволит обеспечить эксплуатацию судов смешанного река-море плавания в основной оперативной зоне (Черное, Каспийское моря, значительная часть Средиземного моря) без принятой сейчас подробной регламентации районов и сезонов плавания, с увеличенным удалением от мест убежищ.

3. УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ И ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ ФАКТОРОМ. РОЛЬ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

Используя вышеполученные результаты и подходы, принятые в ФОБ, можно сделать вывод, что с позиций недопустимого риска следует контролировать риск, возникающий при грузовых операциях несамостоятельных СВВП.

Аналогичный вывод следует из вероятности воздействия данной опасности на корпуса СВВП, даже отвлекаясь от уровня риска, ему соответствующего и из вероятности несчастного случая для членов экипажей судов.

Следовательно, эта опасность получает наивысший приоритет с позиций формальной оценки безопасности.

Помимо грузовых операций, с позиций последствий воздействия опасности необходимо обеспечить контроль риска при любых опасностях с уровнем последствий $C = 3$ и выше.

Для самостоятельных СВВП таковыми опасностями являются посадка на мель и нарушение непроницаемости отсеков.

Для самостоятельных судов системы таковыми опасностями являются посадка на мель и ошибки при грузовых операциях.

Другой областью риска, требующей контроля, являются факторы, определяющие несущую способность корпуса судна, как-то:

- техническое состояние, включая накопленные при грузовых операциях, шлюзованиях, посадках на мель, контактах со стенками каналов и иных объектов, остаточные деформации продольных связей и пластин, а также коррозионный и механический износ;

- система набора корпуса;
- устойчивость продольных РЖ при продольной системе набора;
- ошибки проектирования, технологии постройки, ремонта.

Как показывает отечественный опыт постройки и эксплуатации СВВП в 1945-1990 гг., основным методом снижения вероятности переломов корпусов было увеличение стандарта общей прочности.

Количественный и качественный рост стандарта общей прочности обеспечивался следующими мероприятиями:

- увеличением толщин и размеров связей, т.е. увеличением металлоемкости корпусов (за 50 лет практически в два раза);

- изменением методики расчета усилий от общего изгиба за счет увеличения для отдельных классов расчетного дополнительного (волновой и ударный) изгибающего момента; введением учета неравномерности загрузки судов и затопления пиков; проверки общей прочности при грузовых операциях для промежуточных случаев из инструкции по погрузке и выгрузке; проверки общей прочности при удифферентовке судна для осмотра винта, что могло приводить к увеличению размеров связей;

- изменением методики расчета общей прочности за счет увели-

чения коэффициентов запаса; проверки прочности для корпуса к концу срока службы с учетом износа и деформаций, что также могло приводить к увеличению размеров связей;

- сменой поперечной системы набора крайних поясков эквивалентного бруса на продольную;
- для продольной системы набора увеличением устойчивости продольных РЖ за счет уменьшения рамной шпации и увеличения момента инерции поперечного сечения профилей продольных РЖ.

Другим путем снижения аварийности корпусов СВВП является повышение качества проектирования и постройки.

Как отмечалось ранее, основные опасности, вызывающие переломы корпусов СВВП, связаны с действием «человеческого» фактора при грузовых операциях, при посадках на мель, нарушении непроницаемости, ремонте. Вероятность воздействия таких опасностей может быть реально снижена организационными мероприятиями.

На отечественном речном транспорте есть яркий пример эксплуатации серии СВВП с приемлемым уровнем аварийности при относительно слабом корпусе. Речь идет об т.н. «хлебных» тентовых (трюмных) баржах пр. 278, которые, несмотря на возраст за 25-35 лет, поперечную систему набора, стандарт общей прочности всего $m_{пр} = 0,0052$, явно из зоны недопустимого риска (см. точку в левом нижнем углу на рис. 4), имели вероятность перелома за год $p_{ав} = 0,00182$.

Применялись известные организационные меры по контролю риска: облегченный режим эксплуатации; запрещение применения грейферов; наличие постоянной команды; надзор за состоянием корпуса; строгое выполнение требований инструкций по погрузке и выгрузке. Как следствие, суда имели малый износ связей, деформации практически отсутствовали, несмотря на толщины корпуса в 5 и 6 мм.

Используя соответствующий опыт морских судов, можно предложить иные организационные мероприятия, связанные с контролем фактического напряженного состояния корпусов в эксплуатации, а именно:

- бортовые ПЭВМ с программами контроля загрузки и прочности корпуса, прогнозирования грузовых операций;
- подробные инструкции по загрузке, погрузке, выгрузке, балластировке с указанием усилий, возникающих в том или иной состоянии нагрузки с оценкой степени опасности, и с указанием контрольных параметров – осадок на марках, уровней груза, балласта и запасов.

К практическим вариантам регулирования риска следует отнести меры организационные (в эксплуатации) и меры при проектировании корпуса (нормирование).

Суть применения ФОБ состоит в том, что для ранжированных определенным образом опасностей следует найти такие меры по уменьшению их вероятности и последствия воздействия, стоимость Z реализации

которых будет меньше изменения риска ΔR , также определенного в стоимостном виде.

Для СВВП, особенно безэкипажных, применение организационных (активных) мер сопряжено со значительными практическими трудностями, т.к. организация процесса погрузки-выгрузки (ошибки во время которого являются главной опасностью с позиций перелома) производится портами. В интересах порта сократить время стоянки СВВП, уменьшить трудозатраты, удешевить технологию грузовых операций, что далеко не всегда соответствует требованиям инструкций по погрузке и выгрузке.

Поэтому для СВВП речь идет в первую очередь о втором способе решения условия обеспечения приемлемого риска. Решается задача совершенствования норм расчета прочности корпусов («пассивные» меры по управлению риском).

К ним следует отнести:

расчет прочности корпуса с учетом «непроектных» воздействий, особенностей эксплуатации судов на внутренних водных путях;

исключение нормативным путем ранее выявленных ошибок и недостатков проектирования и конструирования корпусов СВВП.

На рис. 4 дана графическая зависимость между вероятностью перелома корпуса СВВП за год $p_{ав}$ и стандартом прочности $m_{пр}$ для конкретных проектов судов, эксплуатировавшихся на ВВП СССР [9].

Полученная исправленная зависимость между вероятностью переломов корпуса и стандартом прочности позволила выделить три зоны риска.

При $m_{пр}^{80} \leq 0,019$ число переломов растет по экспоненциальной зависимости по мере уменьшения несущей способности корпуса. Можно признать, что суда в этой зоне имеют недопустимый уровень риска.

При $m_{пр}^{80} \geq 0,036$ вероятность перелома существенно снижается. Можно отметить, что эта вероятность гарантированно меньше $[p_{ав}] = 0,00100$. Суда в этой зоне имеют незначительный уровень риска.

Между указанными зонами находится поле, куда относятся подавляющее большинство существующих СВВП. При $m_{пр}^{80} = 0,019-0,036$ вероятность перелома корпуса практически не зависит от формально рассчитанного $m_{пр}^{80}$, а определяется иными причинами, в первую очередь человеческим фактором.

Таким образом, для большинства исследуемых объектов определяющим является не столько величина предельного момента, сколько качество корпуса (наличие-отсутствие поперечной системы набора, устойчивость продольных РЖ при продольной системе набора, качество постройки и ремонта, наличие-отсутствие эксплуатационных повреждений

элементов корпуса) и качество эксплуатации (наличие-отсутствие постоянного экипажа, выполнение требований инструкций по погрузке и выгрузке, ошибки судовождения, выход из строя элементов винто-рулевого комплекса и СЭУ и т.п.).

Применяя полученные результаты, можно определить «гарантированный» стандарт прочности для несамоходных судов различной длины. Как видно из рис. 4, у судов с $m_{пр}^{80} \geq 0,036$, переломов корпусов не наблюдалось. Следовательно, выполнение такого «гарантированного» стандарта должно обеспечить отсутствие переломов корпусов практически вне зависимости от ошибок в эксплуатации.

Для условного судна с $L = 80$ м «гарантированный» стандарт общей прочности в 1,9 раза превышает минимальный. Такова цена качества проектирования, постройки и эксплуатации.

Необходимо либо добиваться минимизации «человеческого» фактора, либо строить корпуса практически в два раза более прочные и тем самым не опасаться за последствия воздействия человека.

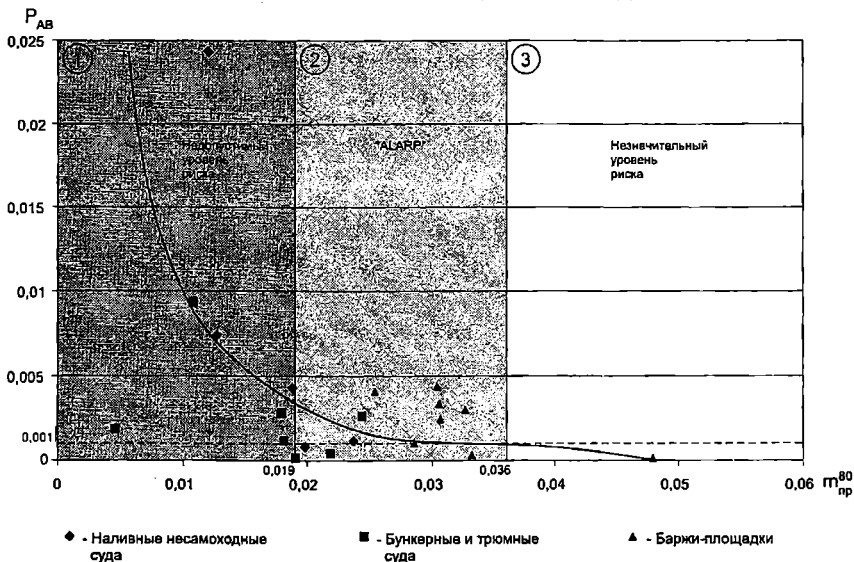


Рис. 4. Вероятность перелома корпуса как функция стандарта общей прочности

Правила PPP имеют по близким классам избыток стандарта общей прочности по сравнению с Правилами РС в пределах 5-7%, однако этого совершенно недостаточно, чтобы скомпенсировать «человеческий» фактор. Соответственно, аргумент о том, что наличие некоторого незначительного запаса существенно изменит надежность и безопасность исследуемых объектов, не соответствует полученным результатам исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ риска позволяет сделать следующие выводы:

1. Стандарт прочности корпусов СВВП следует определять с учетом «непроектных» воздействий и особенностей эксплуатации судов на внутренних водных путях, пересмотрев главенствующую роль волновой составляющей.

2. Уточнить требования к стандарту общей прочности для ССП, основываясь на анализе требований РС, анализе металлоемкости и конкурентоспособности правил.

3. Сбалансировать требования к стандарту общей прочности Правил с требованиями, изложенными в ПОСЭ, Руководствах РРР по обновлению и по строительству судов с применением элементов существующих судов. При этом принять за базу Руководство РРР по строительству судов с применением элементов существующих судов.

4. Разработать единые требования к определению волнового изгибающего момента для СВВП и ССП.

5. Исключить суммирование напряжений от общего и местного изгиба при выполнении проверочных расчетов прочности. Допускаемые напряжения от местного изгиба поставить в зависимости от запасов общей прочности.

6. Установит в Правилах четкую зависимость стандарта общей прочности судна к концу срока службы к аналогичным требованиям на стадии проектирования.

7. Разработать критерий эксплуатационной усталостной прочности для ССП (в перспективе).

8. Уточнить минимальные толщины и стандарт прочности в зависимости от срока службы.

9. Переработать нормативы местной прочности корпусов СВВП и ССП, включая «офизичивание» нагрузок и уточнение расчетных формул.

10. Сбалансировать требования к местной прочности Правил с требованиями, изложенными в ПОСЭ.

11. Ввести класс М-СП 4,5.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Правила: В 4 т. / РРР. – Москва: «По Волге», 2002. – Т. 2: Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания. – С. 9-248.*
2. *Обновление судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Руководство. Р. 002-2002/РРР. – М.: РРР, 2002. – 28 с.*
3. *Строительство судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания с ограниченным использованием элементов эксплуатировавшихся судов. Руководство. Р.003-2003/РРР. – М.: РРР, 2003. – 36 с.*
4. *Обновление судов технического флота. Руководство. Р.016-2006/РРР. – М.: РРР, 2006. – 49 с.*
5. *Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment (FSA) to the IMO Rule-Making Process. – 1997. – 22 p.*
6. *Свечников О.И. Снижение металлоемкости корпусов судов внутреннего плавания. – М.: Транспорт, 1987. – 221 с.*
7. *Егоров Г.В. Оценка риска при переломах корпусов судов внутреннего плавания // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2001. – № 4(376). – С. 33-43.*
8. *Егоров Г.В. Анализ аварий корпусов судов ограниченных районов плавания // Проблеми техніки. – 2002. – № 3. – С. 3-25.*
9. *Егоров Г.В. Несущая способность и переломы корпусов судов внутреннего плавания // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2001. – № 1(373). – С. 3-12.*

Надійшла 26.05.06

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассматривается эффективный алгоритм расчетного обоснования модернизации судовых конструкций с целью отстройки частотного спектра от резонансных частот. В качестве основного использован метод конечных элементов. Применение гипотезы неизменяемости форм свободных колебаний в процессе модернизации и энергетических принципов оценки частотного спектра конструкции позволило выполнять сложные оптимизационные расчеты при минимальных затратах вычислительных ресурсов. В качестве примера рассмотрена отстройка частот свободных продольных колебаний рубки судна типа т/х «Волга-Дон» путем изменения толщин стенок продольных переборок.

Ключевые слова: метод конечных элементов, судовые конструкции, отстройка частотного спектра.

В настоящее время является общепризнанной необходимостью расчетного обоснования эффективности технических мероприятий, направленных на изменение динамических характеристик судовых конструкций с учетом условий их работы. Воздействие ряда факторов на конструкции и судно в целом в процессе его эксплуатации обуславливает применение адекватных расчетных схем.

Метод конечных элементов позволяет построить корректную модель, отражающую реальные особенности условий эксплуатации корпусных конструкций. Однако при обосновании технических решений (путем оптимизации сложных судовых конструкций) возникает необходимость многократного расчета как функции цели, так и разного рода ограничений. Учитывая то обстоятельство, что высокий порядок задачи создает определенные затруднения в ее реализации, приходится идти на допущения, упрощающие решение этой практически важной и ответственной проблемы.

Современный высокий уровень проектирования судовых корпусных конструкций можно связать с развитием вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения. Несмотря на это, в последнее время наблюдается относительный рост объема отказов усталостного происхождения, обусловленных резонансными колебаниями элементов судового корпуса, что подчеркивает актуальность проблемы повышения достоверности расчетного анализа их динамических параметров.

Увеличение числа повреждений усталостного характера объясняется повышением интенсивности эксплуатации облегченных конструкций, спроектированных по уточненным схемам с минимальными запасами статической прочности и, как следствие, повышенным риском смещения частотного спектра в зону резонансных колебаний.

Главным условием надежной работы конструкции при действии динамических нагрузок является достаточный «запас» по частоте, обеспечивающий отсутствие резонансных явлений. Как правило, выход из резонансной зоны осуществляется путем модернизации конструкции в целом или отдельных ее фрагментов, заключающейся в перераспределении жесткостей (иногда масс или других параметров). Выбор наиболее эффективного способа вывода конструкции из резонансной области представляет самостоятельную и довольно сложную задачу расчетного проектирования.

В этой связи представляется актуальной разработка упрощенных алгоритмов, позволяющих выполнять расчетное обоснование рациональной отстройки частотного спектра от резонансной области в рамках приемлемых затрат вычислительных ресурсов. Существенные упрощения можно получить на базе гипотезы о неизменяемости форм свободных колебаний конструкции в процессе ее модернизации [1].

Рассмотрим пример модернизации конструкции рубки судна типа река-море пр. RSD09-МИБ (см. рис. 1) с целью снижения коэффициента динамичности (при гармоническом изменении нагрузки)

$$\alpha_{\partial} = \left| (1 - z^2)^{-1} \right|, \quad (1)$$

где $z^2 = \Omega / \Lambda$ – отношение частот;

Ω – квадрат частоты гармонической нагрузки;

Λ – квадрат собственной частоты конструкции.

Целью расчета является определение значений основных собственных частот продольных колебаний рубки и палуб ярусов.

В качестве основного применяем метод конечных элементов с использованием плоских и пространственных пластинчато-стержневых систем. При этом базовыми служат восьмиузловая пластина и трехузловой стержень (с разрешенными 6-ю степенями свободы в узле), включенными в программный комплекс ANSYS.

Главным требованием, предъявляемым к величине основной частоты продольных колебаний рубки в целом, является исключение ее резонанса с лопастной частотой первого порядка (см. табл. 1), т.е.

$$\lambda_1 \geq 1,2 \omega_1, \quad (2)$$

где λ_1 – частота основного тона продольных колебаний надстройки;
 ω_1 – первая лопастная частота на полном ходу (см. табл. 1).

Таблица 1

| Номер | Наименование источника возмущающих сил | Частоты, мин-1 |
|-------|--|----------------|
| 1 | Частота вращения гребного вала, n | 173,6 |
| 2 | Лопастная частота, $N1=n*z = 173,6*4$ | 694,4 |
| 3 | Частота вращения коленвала двигателя | 750 |
| 4 | Цилиндровая частота | 3000 |

Цель модернизации состоит в обеспечении отстройки первой частоты свободных продольных колебаний рубки на 10-15% от цилиндрической частоты при одновременном сохранении достаточного «запаса» по частоте на высших формах колебаний. В качестве возможного района модернизации приняты жесткости стенок юта и 1-го яруса. Заметим, что основному критерию (2) конструкции рубки удовлетворяют в полном объеме.

Жесткость рубки в продольном направлении определяется в основном боковыми стенками, продольными плоскими переборками и палубами ярусов. Эти связи включаются без учета вырезов. Торцевые стенки рубки, поперечные переборки на жесткость в продольном направлении практически не влияют, поэтому в расчетную схему не включаются. Принятая плоская модель требует существенно меньших затрат времени без особого ущерба точности расчета, поэтому в качестве расчетной рассматривается пластина приведенной толщины, конфигурация которой соответствует проекции надстройки на диаметрально плоскость.

Таблица 2

Параметры жесткости и масс исходной модели рубки

| Наименование элемента | Толщина, мм | Площадь, m^2 (0,5x F) | Расчетная толщина, мм | Удельная масса, t/m^2 |
|-------------------------|-------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Стенка рулевой рубки | 6 | 27,0 | 9,0 | 0,115 |
| Стенка 3-го яруса | 6 | 22,5 | 9,0 | 0,115 |
| Стенка 2-го яруса | 6 | 22,5 | 9,0 | 0,115 |
| Стенка 1-го яруса | 6 | 22,5 | 9,0 | 0,115 |
| Стенка юта | 6 | 22,5 | 9,0 | 0,115 |
| Крыша рулевой рубки | 6 | 38,1 | 7,34 | 0,115 |
| Палуба ходового мостика | 6 | 60,0 | 7,34 | 0,115 |
| Палуба 3-го яруса | 6 | 60,0 | 7,34 | 0,115 |
| Палуба 2-го яруса | 6 | 60,0 | 7,34 | 0,115 |
| Палуба 1-го яруса | 6 | 60,0 | 7,34 | 0,115 |

Примечание. В столбце 5 приведены удельные массы конструкций с учетом их изоляции, оборудования и проч. насыщения.

Массы всех конструкций надстройки с учетом изоляции и навешенного оборудования распределяются по площади пластины в соответствии с их фактическим пространственным расположением (см. табл. 2). Масса оборудования, изоляции и насыщения, как правило, оказывается примерно равной массе корпусных конструкций, поэтому учет этой массы может привести к существенному снижению расчетного значения частоты. Стержневые элементы, моделирующие жесткость палуб, вводятся с нулевой погонной массой. Параметры жесткости и масс элементов расчетной схемы приведены в табличной форме. Результаты динамического анализа представлены на рис. 2, 3 и в табл. 3, 4.

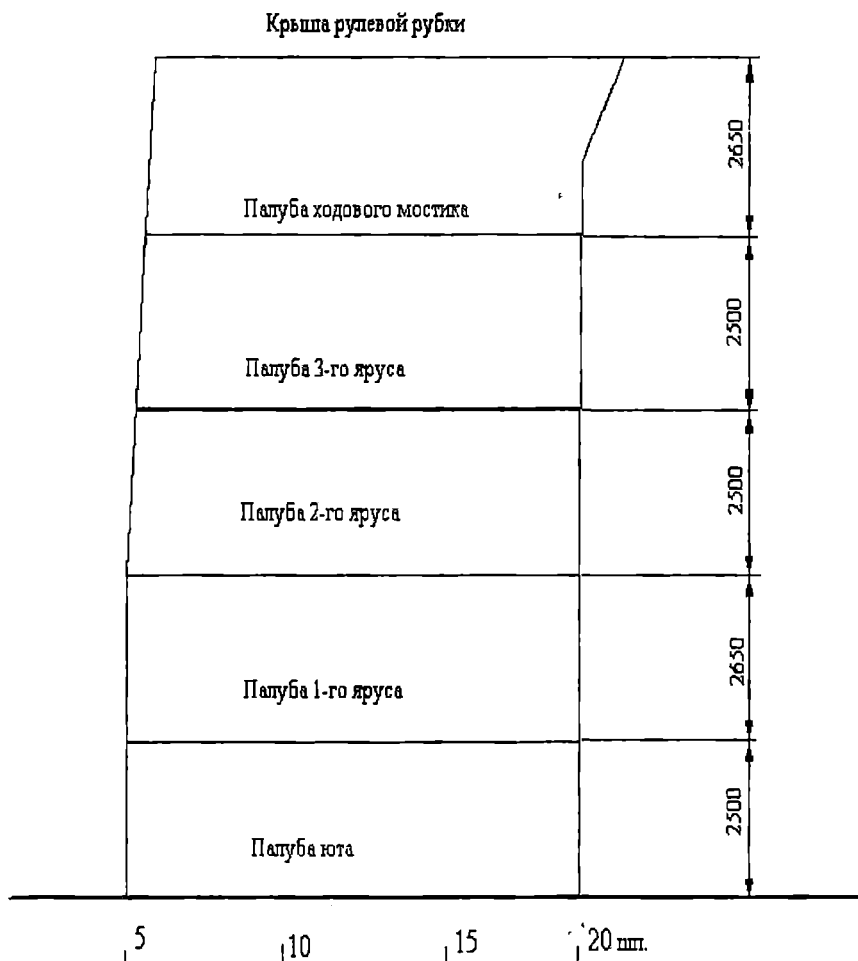


Рис. 1. Расчетная схема рубки и ее конечноэлементная модель

Поставленная задача решается приближенно. В рамках метода конечных элементов свободные колебания упругой конструкции описываются следующей системой:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = 0, \quad (3)$$

где $[K]$, $[M]$ – матрицы жесткости и масс дискретной модели конструкции;

$\{q\}$ – вектор узловых перемещений.

Соответствующее уравнение форм колебаний принимает вид

$$([K] - \Lambda[M])\{V\} = 0. \quad (4)$$

Решение однородной системы даст спектр собственных значений Λ и форм $\{V\}$. В нашем случае последние удобно нормировать по кинетической энергии, т.е.

$$\{V\}^T [M] \{V\} = 1. \quad (5)$$

Частота свободных колебаний в таком случае определится в соответствии с формулой Рэля как

$$\Lambda = \{V\}^T [K] \{V\}. \quad (6)$$

Правая часть (5) представляет потенциальную энергию конструкции, накапливаемую при колебательном движении. Эта энергия может быть получена как сумма энергий всех конечных элементов дискретной модели

$$\Lambda = \sum \{Vi\}^T [Ki] \{Vi\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (7)$$

где n – количество конечных элементов дискретной МКЭ модели.

Последняя формула позволяет выполнить сравнительный анализ эффективности увеличения (или уменьшения) жесткости отдельных конечных элементов или района конструкции при отстройке от резонансной области частот, а также оценить необходимую жесткость, обеспечивающую наперед заданное увеличение (уменьшение) собственной частоты конструкции в целом.

Таблица 3

Исходный частотный спектр рубки

| SET | TIME/FREQ | LOAD STEP | SUBSTEP | CUMULATIVE |
|-----|-----------|-----------|---------|------------|
| 1 | 50,661 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 151,00 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 164,10 | 1 | 3 | 3 |
| 4 | 318,09 | 1 | 4 | 4 |

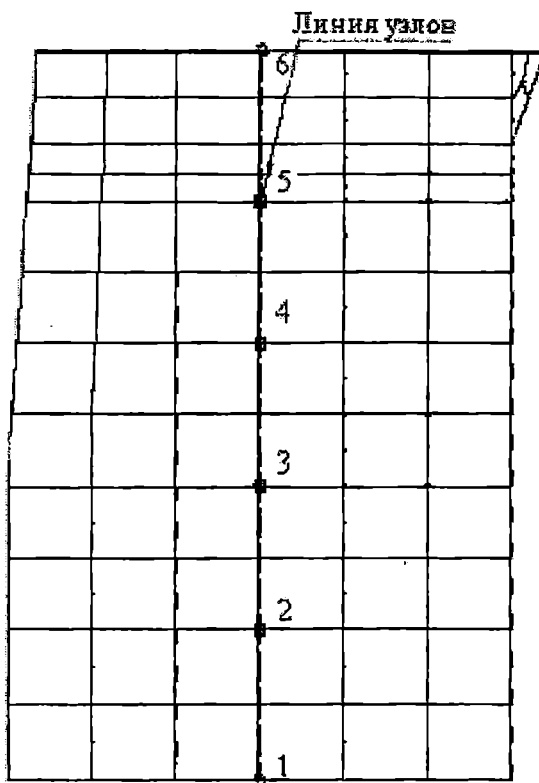


Рис. 2. Положение контрольных точек модели

Форма

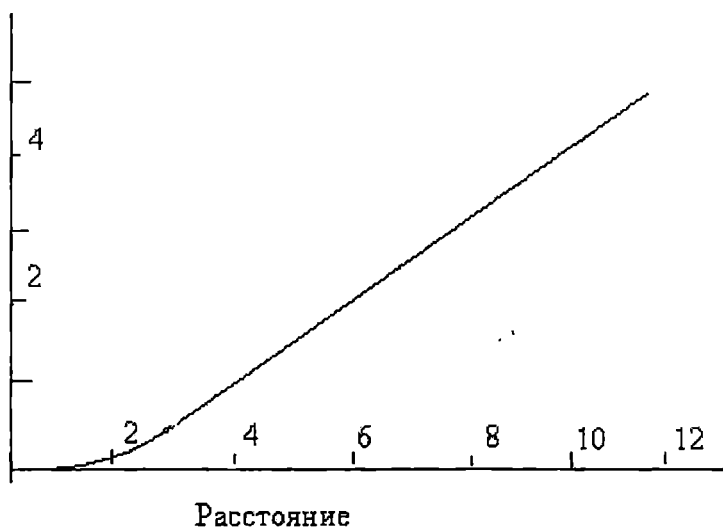


Рис. 3. Первая форма колебаний на частоте 50,661 Гц

Форма

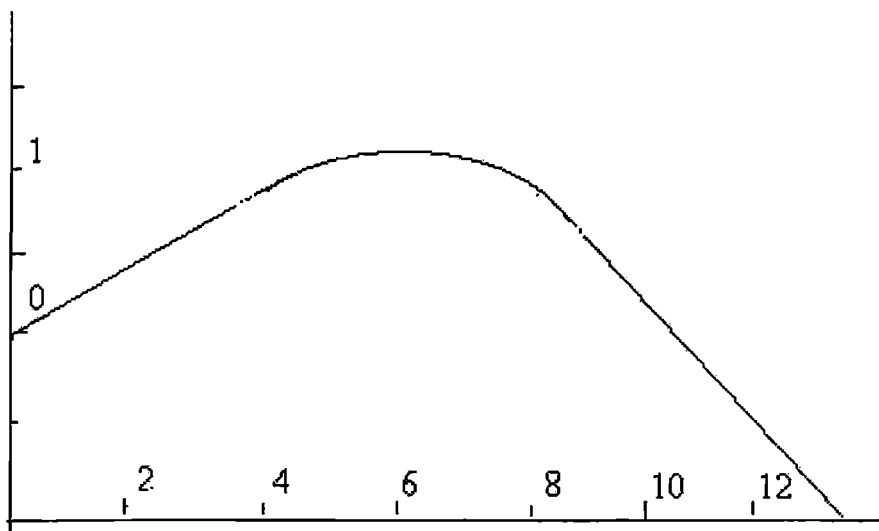


Рис. 4. Вторая форма колебаний надстройки на частоте 151 Гц

Таблица 4

Результирующий частотный спектр рубки

| SET | TIME/FREQ | LOAD STEP | SUBSTEP | CUMULATIVE |
|-----|-----------|-----------|---------|------------|
| 1 | 56,295 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 164,13 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 175,67 | 1 | 3 | 3 |
| 4 | 319,44 | 1 | 4 | 4 |

Формы колебаний практически остались прежними.

Требуемое смещение спектра частот достигнуто в результате увеличения контролируемых жесткостей стенок на 25%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукаш Э.П. Оптимизация параметров надежности корпусных конструкций. Тез. докл. международной конференции по строительной механике корабля памяти проф. П.Ф. Папковича, СПб., 2002. – С. 78-81.

Надійшла 23.05.06

УДК 624.012.35.042

В. А. Гришин
Н. А. Яременко

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ И НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ

Приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния безбалочного перекрытия, деформативности и несущей способности неразрезной железобетонной плиты. Они сравниваются с экспериментальными данными Л. Н. Зайцева и расчетными данными Г. Маркуса.

Ключевые слова: безбалочное перекрытие, неразрезная железобетонная плита, надколонные полосы, пролет поля, сетка.

Безбалочными перекрытиями называют плиты, которые не поддерживаются ребрами, а покоятся на отдельных колоннах или стойках. Простейшим типом подобного перекрытия является четырехугольная пластинка, опирающаяся по четырем углам. Для перекрытия больших пространств приходится прибегать к плитам, опирающимся на большое число рядов колонн.

Так как малые опорные площадки вызывают в местах опирания значительные напряжения от скалывания и изгиба, то приходится утолщать верхушки колонн в виде гриба или бокала и жестко сопрягать плиту со стойками. Поэтому безбалочные перекрытия часто называют грибовидными [1, 2].

Эти перекрытия отличаются от обычных железобетонных балочных перекрытий главным образом отсутствием несущих ребер. Гладкая нижняя поверхность позволяет достигнуть лучшего освещения и вентиляции, избежать скопления пыли и беспрепятственно устраивать проводку и трансмиссию в любом направлении. К этому следует добавить, что высота помещения используется лучше и, следовательно, кубатура здания, особенно при многоэтажных сооружениях, может быть значительно уменьшена.

Безбалочные перекрытия имеют еще то преимущество, что при гладкой нижней поверхности их опалубка значительно проще, чем у ребристых перекрытий.

Проектирование и возведение таких перекрытий, технические и экономические преимущества которых очевидны, требуют особой тщательности, так как уменьшение строительной высоты при достаточной прочности возможно только в том случае, когда подбор сечения основан

на точном исследовании напряженного состояния и могут быть даны беспорные гарантии использования прочностных свойств материала.

В целях осуществления жесткой связи между плитой и колонной длина оси поперечного сечения колонны должна быть не меньше половины измеренного в том же направлении опорного расстояния l (причем l измеряется между осями опор), но не менее 30 см и, кроме того, не менее $1/15$ высоты этажа. В перекрытиях без утолщения плиты длину капители колонны, измеряемую по нижней поверхности плиты, надлежит назначать не менее $2/9 l$.

Толщина плиты должна быть не менее 15 см и не менее $1/32$ большего из обоих пролетов для междуэтажных перекрытий и, соответственно, $1/40$ для крыш [2].

Изменение архитектурных и технологических требований в промышленности и гражданском строительстве неизменно приводит к изменению конструктивных форм.

Появившаяся в последние годы необходимость в гибкой планировке зданий и новых решениях интерьеров заставила специалистов подумать о гладком решении потолка – без капителей колонн. В связи с этим появилась тенденция к усилению зоны опирания плиты безбалочного перекрытия на колонну с тем, чтобы освободиться от капителей [3].

Конструкторская мысль шла по пути замены традиционной капители элементом более прочным, чем плита, а, стало быть, меньшей толщины, позволяющей не выходить из габарита плиты по толщине. Введением в опорную зону плиты прочного вкладыша была исключена капитель. Вкладыш выполняет при этом конструктивные функции капители, увеличивая площадь опоры плиты.

Безбалочное перекрытие с девятью квадратными полями

Выберем для примера квадратное перекрытие, свободно опертое по краям и покоящееся на четырех колоннах, как показано на рис. 1. Оно имеет три одинаковых продольных и поперечных ряда, которые содержат два угловых поля I и одно краевое II, либо два краевых поля II и одно центральное III. Всего имеем девять квадратных полей с одинаковой длиной стороны l (рис. 2).

Будем предполагать сплошное шарнирное опирание наружных краев, так как перекрытия в большинстве случаев опираются на наружные стены.

При равномерном загрузении всех полей нагрузкой g в средних опорных точках возникают одинаковые реакции.

Прогибы и изгибающие моменты равномерно нагруженного $g = 20 \text{ кН/м}^2$ безбалочного перекрытия с девятью квадратными полями пролетом $l = 2 \text{ м}$ приведены в табл. 1 и на рис. 3.

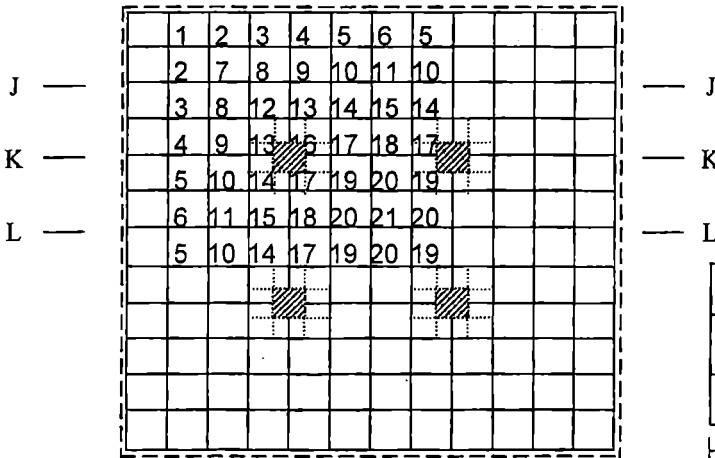


Рис. 1. Схема опирания перекрытия;
номера узлов

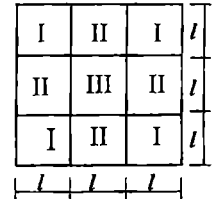


Рис. 2. Номера
полей

Таблица 1

Прогибы и изгибающие моменты равномерно нагруженного безбалочного перекрытия с девятью квадратными полями ($l = 2\text{ м}$, $g = 20 \text{ кН/м}^2$)

| Точка | Множитель $\frac{gl^4}{256EI}$ | Прогиб $W, \text{ мм}$ | | Погрешность, % | Множитель $\frac{gl^2}{16}$ | | Моменты, кНм | | | |
|-------|--------------------------------|------------------------|-------|----------------|-----------------------------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| | | Маркус | Автор | | Mx | My | Маркус | | Автор | |
| | | | | | | | Mx | My | Mx | My |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 2 | 1.399 | 2.94 | 2.85 | 3,06 | 0.69 | 0.38 | 3.43 | 1.90 | 2,16 | 0,92 |
| 7 | 2.112 | 4.44 | 4.46 | -0,45 | 0.70 | 0.70 | 3.50 | 3.50 | 2,01 | 2,00 |
| 8 | 2.125 | 4.47 | 4.79 | -7,16 | 0.24 | 1.00 | 1.19 | 4.99 | 0,66 | 3,50 |
| 9 | 1.899 | 4.00 | 4.57 | -14,25 | -0.31 | 1.24 | -1.57 | 6.22 | 0,08 | 4,24 |
| 10 | 1.987 | 4.18 | 4.27 | -2,15 | -0.01 | 1.14 | -0.04 | 5.70 | -0,39 | 3,48 |
| 11 | 2.084 | 4.39 | 4.18 | 4,78 | 0.19 | 1.07 | 0.96 | 5.35 | -0,21 | 2,66 |
| 4 | 1.491 | 3.14 | 3.12 | 0,64 | 1.08 | -0.07 | 5.42 | -0.33 | 2,91 | 0,29 |
| 9 | 1.899 | 4.00 | 4.16 | -4,00 | 1.24 | -0.31 | 6.22 | -1.57 | 2,91 | -0,13 |
| 13 | 1.062 | 2.23 | 2.42 | -8,52 | 0.22 | -0.91 | 1.12 | -4.57 | 2,65 | -3,24 |
| 16 | 0 | 0.00 | 0 | - | -1.87 | -1.87 | -9.35 | -9.35 | -9,18 | -8,71 |
| 17 | 0.381 | 0.80 | 1.34 | -67,5 | 0.00 | -1.09 | 0.01 | -5.47 | 2,01 | -3,34 |
| 18 | 0.761 | 1.60 | 2.40 | -50 | 0.76 | -0.79 | 3.80 | -3.96 | 2,91 | -0,58 |
| 6 | 1.557 | 3.28 | 2.67 | 18,60 | 1.03 | 0.07 | 5.16 | 0.33 | 2,79 | -0,51 |
| 11 | 2.084 | 4.39 | 3.74 | 14,81 | 1.07 | 0.19 | 5.35 | 0.96 | 2,47 | -0,09 |
| 15 | 1.54 | 3.24 | 3.29 | -1,54 | 0.24 | 0.46 | 1.18 | 2.30 | 0,33 | 2,00 |
| 18 | 0.761 | 1.60 | 2.42 | -51,25 | -0.79 | 0.76 | -3.96 | 3.80 | -0,87 | 3,14 |
| 20 | 0.774 | 1.63 | 1.75 | -7,36 | -0.13 | 0.46 | -0.65 | 2.28 | -0,27 | 1,56 |
| 21 | 0.917 | 1.93 | 1.56 | -19,17 | 0.29 | 0.29 | 1.43 | 1.43 | 0,38 | -0,09 |

Они определены в предположении упругой работы материала по расчетным формулам Г. Маркуса [1] и при помощи компьютерной программы автора RUSHT-KESSON [4]. Предполагалось, что перекрытие не сопротивляется кручению.

Для большей наглядности на рис. 3 изображены упругие линии прогибов f и эпюры изгибающих моментов M в трех сечениях $J - J, K - K, L - L$, которые будем называть в дальнейшем: *краевым, надколонным и пролетным сечениями*. Эти линии показывают, что наибольшие прогибы имеют место в краевом сечении и наименьшие в надколонном. Наоборот, наибольшие изгибающие моменты возникают в надколонном и наименьшие в краевом сечении.

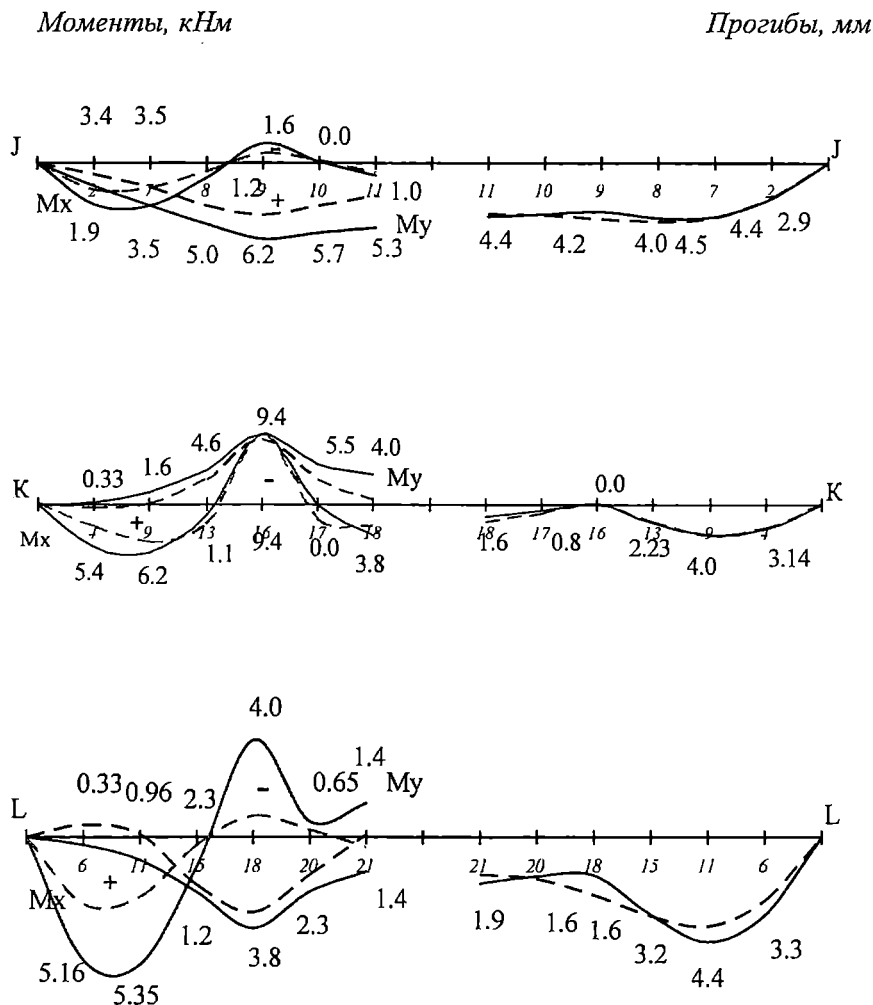


Рис. 3. «Упругие» эпюры изгибающих моментов и прогибов равномерно нагруженного безбалочного перекрытия с девятью квадратными полями: $l = 2\text{ м}$, $g = 20\text{ кН/м}^2$ — Маркус; - - - автор

Это соотношение зависит от разницы в жесткостях рассмотренных сечений: полосы, пересекающиеся опоры и опирающиеся непосредственно на них, работают как неразрезные балки на жестких опорах и имеют сравнительно небольшие прогибы. Полосы, которые не касаются колонн и опираются только по внешним краям, работают как неразрезные балки на упруго податливых опорах и поэтому должны больше прогибаться. Более жесткие надколонные полосы воспринимают также и большую часть нагрузки, и, следовательно, сильнее напряжены. Вблизи опорных точек возникают значительные отрицательные изгибающие моменты, которые на близком расстоянии от оси колонны быстро падают и поэтому для сопротивления плиты не при всех обстоятельствах имеют решающее значение. В краевых и пролетных полосках отрицательные изгибающие моменты меньше положительных и распространяются на большее расстояние, чем в надколонных.

Результаты расчетов автора качественно совпадают с результатами Г. Маркуса. По прогибам имеется и количественное соответствие. Отметим, что вследствие небольшого количества полей благоприятное действие непрерывного опирания внешних краев сказывается также и на внутреннем ряде; изображенные на рис. 3 эпюры усилий Г. Маркуса построены с помощью более густой сетки.

Неразрезная железобетонная плита

Расчет выполнялся применительно к неразрезной железобетонной плите, испытания которой выполнил Л. Н. Зайцев [5]. Плита шарнирно оперта по контуру, а также по линиям, разделяющим поля (рис. 2.).

Перекрытие размером 6,1х6,1 м, пролет каждого поля $l=2$ м. Проектная толщина сечения $h=6$ см. Бетон класса В40. Начальный модуль упругости $E_b=38000$ мПа, сопротивление бетона сжатию $R_b=29,3$ мПа, растяжению $R_{bt}=2,8$ мПа. Армирование плиты – сварными сетками из арматуры диаметром 6 мм; сопротивление стали растяжению $R_s=400$ мПа. Модуль упругости $E_s=2,09 \cdot 10^5$ мПа. Количество арматуры на 1 погонный метр в пролете и на опоре $A_s=1,55$ см². Верхняя арматура размещалась в надколонных сечениях полосами в 1 м. Для такого сечения трещинообразующий момент $M_{crc}=1,41$ кН/м, предельный момент $M_u=5,35$ кН/м. Нижняя арматура центра угловых полей усиливалась четырьмя стержнями $d=6$ мм. Плита загружалась равномерно распределенной нагрузкой ступенями по 5 кН/м² до уровня 30 кН/м², а затем догружалась только центральное поле до уровня 50 кН/м².

На рис. 4 и рис. 5 экспериментальные кривые «нагрузка-прогиб» составлены с расчетными данными автора.

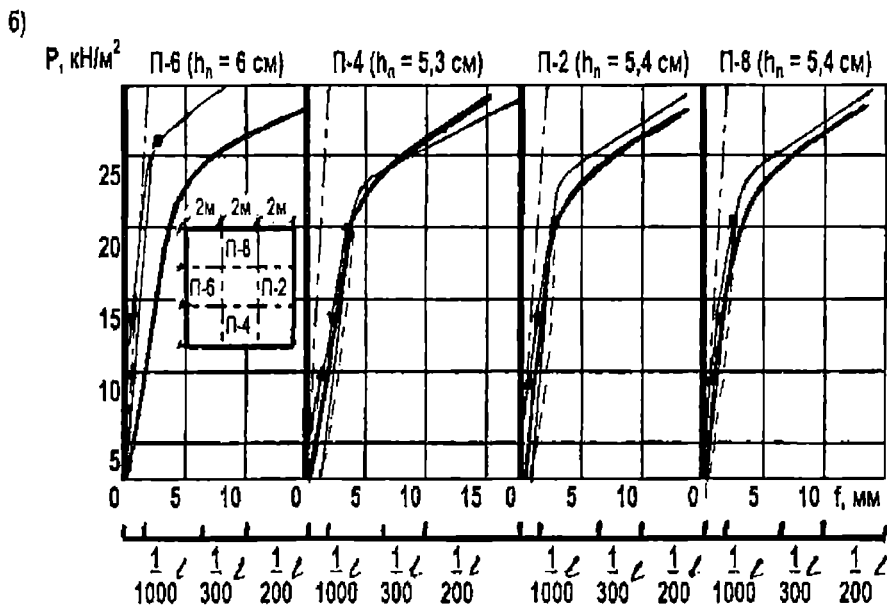
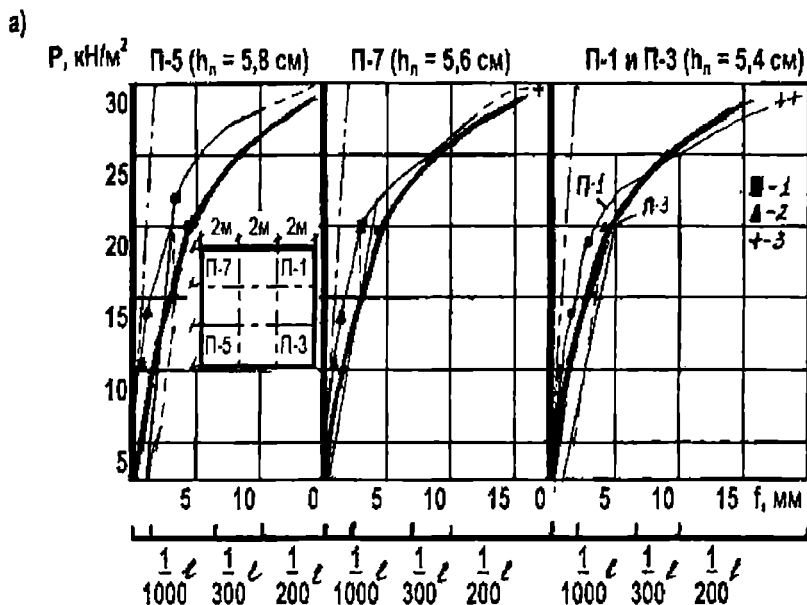


Рис. 4. Прогибы в центре полей при загрузении всей плиты равномерно распределенной нагрузкой а- в угловых полях; б- в боковых полях; 1-появление трещин в пролете; 2-появление и развитие трещин на опорах; 3- потеря несущей способности; ————— опытный ————— расчетный прогиб

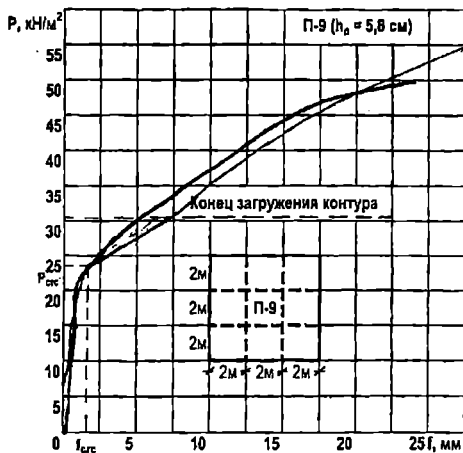


Рис. 5. Зависимость «прогиб-нагрузка» в центральном поле (П-9) при загрузке равномерно распределенной нагрузкой всего неразрезного полотна и при загрузке сверх 30 кН/м^2 только центрального поля — опытная; — расчетная

Картина развития трещин к концу испытаний приведена на рис. 6. Как видно из этих рисунков, существенное увеличение прогибов происходит после появления и развития трещин в пролетах полей при нагрузке $20\text{--}25 \text{ кН/м}^2$. При нагрузке 40 кН/м^2 ширина раскрытия трещин $a_{\text{срс}} \approx 0,3 \text{ мм}$. Расчетная несущая способность неразрезной плиты была достигнута при нагрузке 50 кН/м^2 центрального поля и 30 кН/м^2 остального контура в результате достижения предельных прогибов.

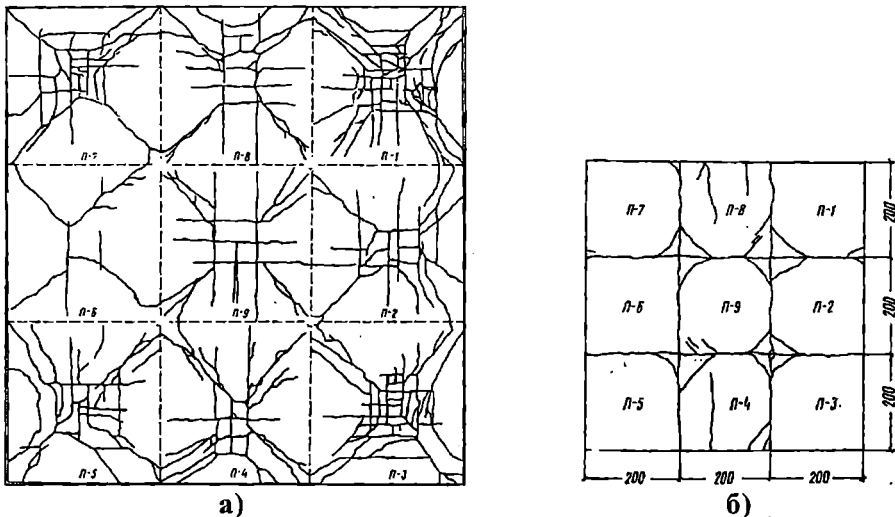
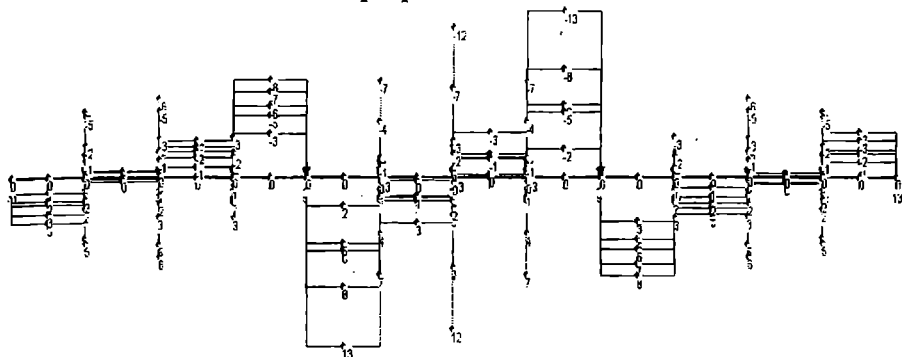


Рис. 6. Развитие трещин в неразрезной плите к концу испытаний: а) — в пролете; б) — над опорами

На рис. 7 и рис. 8 сопоставлены «упругие» прогибы, изгибающие моменты и поперечные силы неразрезной плиты и безбалочного перекрытия с девятью квадратными полями. Деформативность и напряженное состояние безбалочного перекрытия по сравнению с неразрезной плитой выше – прогибы и усилия в 1,5 раза больше.

Нерезная плита



Безбалочное перекрытие

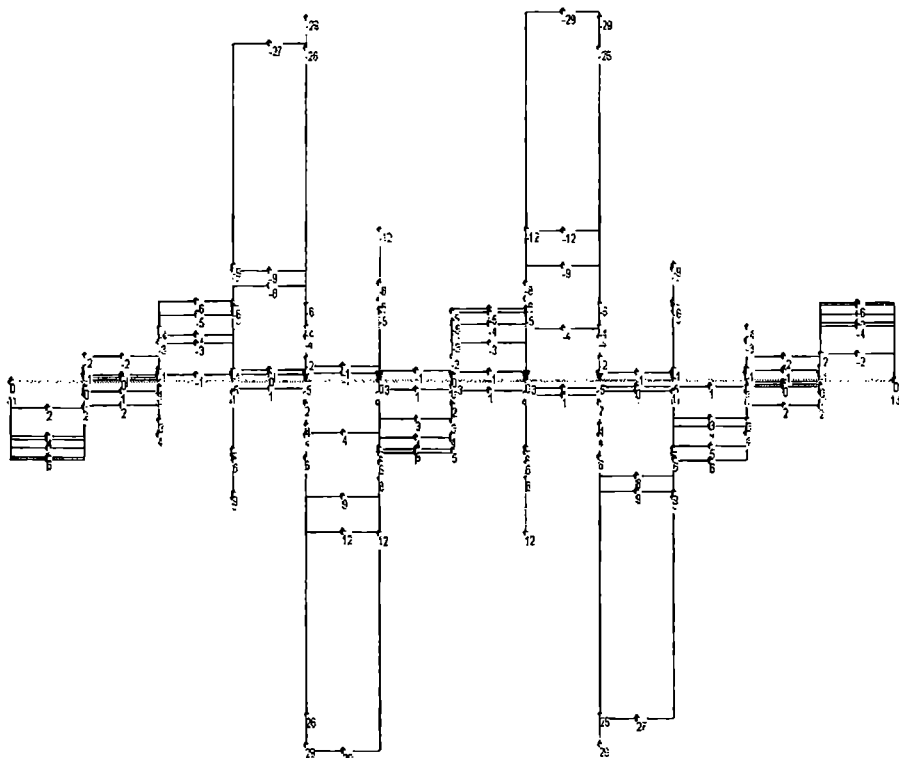
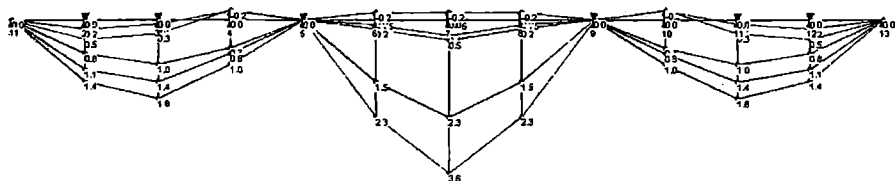


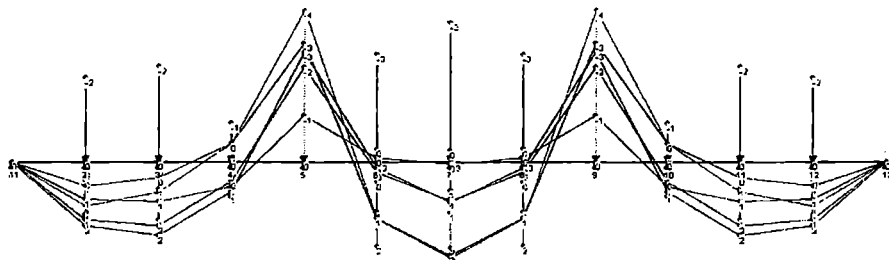
Рис. 7. Сопоставление «упругих» поперечных сил при нагрузке 40 кН/м^2 на центральном поле и 30 кН/м^2 на остальном контуре

Неразрезная плита

W, мм

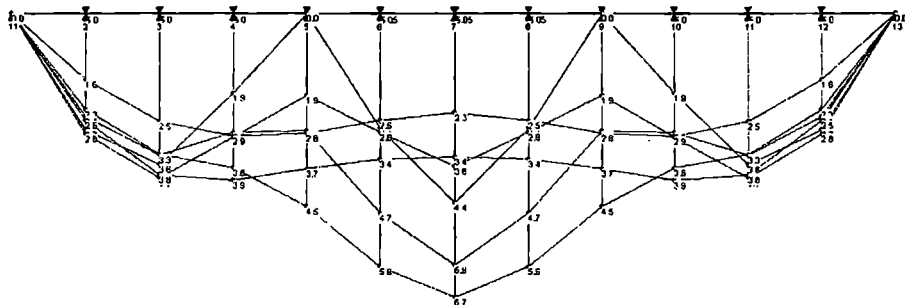


M, кНм



Безбалочное перекрытие

W, мм



M, кНм

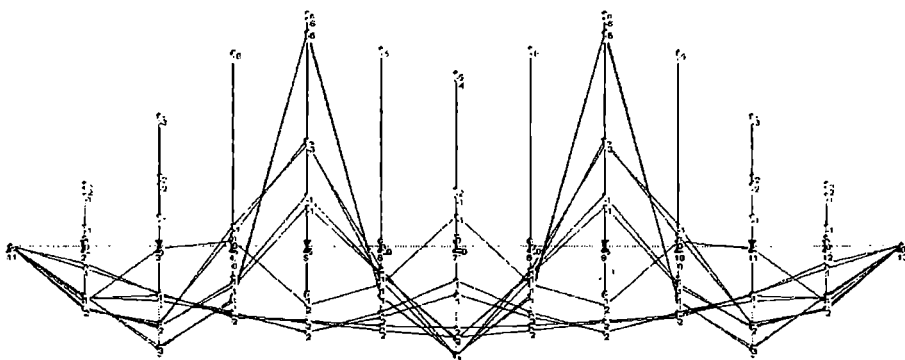


Рис. 8. Сопоставление «упругих» прогибов и изгибающих моментов, при нагрузке 40 кН/м^2 на центральном поле и 30 кН/м^2 на остальном контуре

ВЫВОДЫ

1. Результаты расчета по методу автора безбалочного перекрытия с девятью полями по прогибам совпадают с результатами Г. Маркуса. Рассмотренный пример не дает, однако, полного представления о свойствах безбалочных перекрытий по причине небольшого числа полей. Отметим также концентрацию изгибающих моментов и поперечных сил в окрестности колонн (средних опор).

2. Оцененная расчетом деформативность и несущая способность неразрезной железобетонной плиты совпадает с экспериментальными данными Л. Н. Зайцева.

3. Разработанные автором методика расчета и программное обеспечение позволяет достоверно оценивать напряженно-деформированное состояние безбалочных перекрытий и неразрезных железобетонных плит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркус Г. *Теория упругой сетки и ее приложение к расчету плит и безбалочных перекрытий*. – Х.-К.: Госиздат Украины, 1936. – 442 с.
2. Мёрш Э. *Железобетонные сооружения*. – М.-Л.: Госиздат, 1930. – 546 с.
3. Дорфман А. Э., Левонтин Л. Н. *Проектирование безбалочных безкапитальных перекрытий*. М.: Стройиздат, 1975. – 124 с.
4. Филин О. В., Яременко Е. А., Яременко Н. А. *Напряженно-деформированное состояние предварительно напряженных пролетных строений железобетонных мостов // Ресурсо-экономные материалы, конструкции, здания и сооружения. Вып. 12. – Ровно, 2005. – С. 330-338.*
5. Зайцев Л. Н. *Исследование трещинообразования, деформаций и несущей способности неразрезных железобетонных плит // В сб. НИИЖБ «Воздействие статических, динамических и многократно повторяющихся нагрузок на бетон и элементы железобетонных конструкций».*; М.: Стройиздат, 1972. – С. 105-129.

Надійшла 18.05.06

ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ ГРИНА ПРИ РЕШЕНИИ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Разработана методика построения функции Грина при решении плоской задачи теории упругости методом граничных элементов (МГЭ). Приводится общий алгоритм построения функции Грина, в соответствии с которым получено ее выражение для случая свободных краев продольных кромок пластины.

Ключевые слова: плоская задача теории упругости, функция Грина, граничный элемент.

Задачи механики деформируемого твердого тела сводятся, как правило, к одному или нескольким дифференциальным уравнениям. Получить их решение в замкнутом виде удастся далеко не всегда, поэтому используются численные методы расчета.

Одним из быстро развивающихся в последние годы является метод граничных элементов (МГЭ), применение которого во многих случаях более эффективно, чем использование метода конечных элементов (МКЭ). С помощью МГЭ получены решения целого ряда задач, однако многие вопросы остаются пока нерешенными.

В работе исследуется одна из важнейших и актуальных проблем, возникающих при использовании МГЭ для решения плоской задачи теории упругости – построение функции Грина.

При решении плоской задачи в напряжениях основное разрешающее уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = q, \quad (1)$$

где φ – функция напряжений Эри.

Используя метод Канторовича-Власова, уравнение (1) можно привести к линейному неоднородному дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами, общим решением которого будет

$$Y = C_1 y_1(y) + C_2 y_2(y) + C_3 y_3(y) + C_4 y_4(y) + y_*(y). \quad (2)$$

Частное решение $y_*(y)$ в (2) зависит от вида внешней нагрузки; его удобно представить как

$$y_*(y) = \int_0^y G(y, \xi) q(\xi) d\xi, \quad (3)$$

где $G(y, \xi)$ – функция Грина.

Алгоритм построения функции Грина не зависит от краевых условий задачи и включает следующие операции:

1. Определение констант интегрирования $C_k(\xi)$ ($k=1, 2, 3, 4$) из линейной системы уравнений

$$\begin{vmatrix} y_1(\xi) & y_2(\xi) & y_3(\xi) & y_4(\xi) \\ y_1'(\xi) & y_2'(\xi) & y_3'(\xi) & y_4'(\xi) \\ y_1''(\xi) & y_2''(\xi) & y_3''(\xi) & y_4''(\xi) \\ y_1'''(\xi) & y_2'''(\xi) & y_3'''(\xi) & y_4'''(\xi) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/a_0 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Определитель системы (4) является определителем Вронского, который не равен нулю на $(0, l)$, поэтому система (4) имеет единственное решение.

2. Формирование частного решения

$$Y(y, \xi) = C_1(\xi)y_1(y) + C_2(\xi)y_2(y) + C_3(\xi)y_3(y) + C_4(\xi)y_4(y). \quad (5)$$

3. Построение функции Грина.

$$G(y, \xi) = Y(y, \xi)H(y - \xi), \quad (6)$$

где $H(y - \xi)$ – функция Хевисайда.

Если оговорить, что для функции Грина всегда выполняется неравенство $y > \xi$, то функцию Хевисайда в (6) можно опускать.

В случае свободных краев продольных кромок пластины (при условии, что коэффициент a_0 в основном дифференциальном уравнении равен единице), приходим к системе линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} y_1 C_1 + y_2 C_2 + y_3 C_3 + y_4 C_4 = 0; \\ y_1' C_1 + y_2' C_2 + y_3' C_3 + y_4' C_4 = 0; \\ y_1'' C_1 + y_2'' C_2 + y_3'' C_3 + y_4'' C_4 = 0; \\ y_1''' C_1 + y_2''' C_2 + y_3''' C_3 + y_4''' C_4 = 1, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$y = ch\alpha\xi \sin \beta\xi; \quad y = ch\alpha\xi \cos \beta\xi;$$

$$y = sh\alpha\xi \cos \beta\xi; \quad y = sh\alpha\xi \sin \beta\xi.$$

Решая систему (7) методом Гаусса, получим

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = \frac{\alpha ch\alpha\xi \cos \beta\xi + \beta sh\alpha\xi \sin \beta\xi}{2\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)}; \\ C_2 = \frac{-\alpha ch\alpha\xi \sin \beta\xi + \beta sh\alpha\xi \cos \beta\xi}{2\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)}; \\ C_3 = \frac{\alpha sh\alpha\xi \sin \beta\xi - \beta ch\alpha\xi \cos \beta\xi}{2\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)}; \\ C_4 = \frac{-\alpha sh\alpha\xi \cos \beta\xi - \beta ch\alpha\xi \sin \beta\xi}{2\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)}; \end{array} \right. \quad (8)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{s^2 + r^2}{2}}; \quad \beta = \sqrt{\frac{s^2 - r^2}{2}}; \quad s, r - \text{коэффициенты характеристического уравнения задачи}$$

ческого уравнения задачи

$$k^4 - 2r^2k^2 + s^4 = 0.$$

Учитывая (5) и (6), для функции Грина находим

$$G(y, \xi) = C_1(\xi)y_1(y) + C_2(\xi)y_2(y) + C_3(\xi)y_3(y) + C_4(\xi)y_4(y) =$$

$$= \frac{\alpha ch\alpha\xi \cos \beta\xi + \beta sh\alpha\xi \sin \beta\xi}{2\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)} ch\alpha y \sin \beta y -$$

$$- \frac{\alpha ch\alpha\xi \sin \beta\xi - \beta sh\alpha\xi \cos \beta\xi}{2\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)} ch\alpha y \cos \beta y +$$

$$+ \frac{\alpha sh\alpha\xi \sin \beta\xi - \beta ch\alpha\xi \cos \beta\xi}{2\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)} sh\alpha y \cos \beta y -$$

$$- \frac{\alpha sh\alpha\xi \cos \beta\xi + \beta ch\alpha\xi \sin \beta\xi}{2\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)} sh\alpha y \sin \beta y,$$

или, после несложных преобразований,

$$G(y, \xi) = \frac{1}{2\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)} [\alpha \operatorname{ch}\alpha(y - \xi) \sin \beta(y - \xi) - \beta \operatorname{sh}\alpha(y - \xi) \cos \beta(y - \xi)]. \quad (9)$$

Легко убедиться, что функция (9) обладает всеми свойствами, характерными для функции Грина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов В.А., Даценко А.Ф., Коломиец Л.В., Оробей В.Ф., Сурьянинов Н.Г. / Численные методы в механике. – Одесса: СТАНДАРТЬ, 2005. – 563 с.
2. Оробей В. Ф. Работягов Д. Д. Расчет пластин на изгиб одномерным вариантом метода граничных интегральных уравнений // Изв. вузов. «Строительство». – 1993. – № 1. – С. 20-27.

Надійшла 12.05.06

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ГРУНТОВАЯ СРЕДА - ШПУНТОВАЯ СТЕНКА»

Приведены результаты численного моделирования системы «грунтовая среда – шпунтовая стенка повышенной жесткости». Выявлен оптимальный вариант конструктивного решения для шпунтовой стенки с контрфорсами.

Ключевые слова: шпунт, контрфорс, перемещение, момент, напряжение.

Практика портового гидротехнического строительства показывает, что сооружения типа тонкой стенки (больверк) составляют большую часть возводимых причалов и широко применяются при реконструкции. При строительстве таких причалов особое внимание уделяется монтажу анкерных устройств, который является весьма трудоемким и многодельным.

Предложенное группой авторов (М.П. Дубровский, А.В. Слободяник) новое конструкторско-технологическое решение шпунтовой стенки характеризуется использованием шпунтовых анкеров-контрфорсов (рис. 1, а).

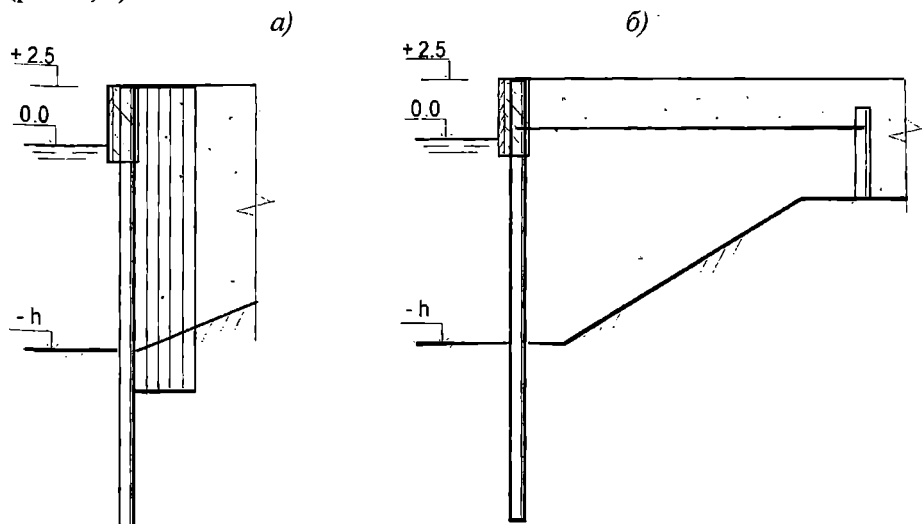


Рис.1. Шпунтовая стенка:
а) с контрфорсами,
б) с анкеркой в одном уровне

Возведение рассматриваемого сооружения может быть осуществлено традиционными методами за исключением операций по монтажу анкеров-контрфорсов, которые устанавливаются с помощью замковых соединений и свай-вставок, что приводит к уменьшению трудоемкости, объемов производства работ и полной унификации элементов [1].

Для оценки напряженно-деформированного состояния шпунтовой стенки нового типа, взаимодействующей с грунтовой средой, выполнено численное моделирование, целью которого являлось:

- определение влияния механических свойств грунтов основания и физико-геометрических характеристик шпунтовой стенки системы «грунтовая среда – сооружение» на величину перемещений стенки и максимальных изгибающих моментов в ней;
- оценка влияния эксплуатационной нагрузки на напряженно-деформируемое состояние (НДС) системы «грунтовая среда – сооружение».

Предложена такая последовательность действий при расчете шпунтовой стенки.

1. В рассмотрение вводится конструкция в виде незаанкеренной шпунтовой стенки с поперечными ребрами жесткости (контрфорсами). Контрфорсы представляют собой короткие шпунтовые стенки. Форма контрфорса может быть с расширением книзу, с расширением кверху, с постоянной по высоте шириной. Верх контрфорса совпадает с верхом шпунтовой стенки. Расположение низа контрфорса подлежит уточнению в процессе расчета и проектирования.

2. Расчетная схема в вертикальной плоскости представляется в виде консольной балки, защемленной в упругом основании (ниже уровня дна) и нагруженной распорным давлением грунта засыпки. Последнее зависит, в частности, от параметров контрфорсов.

3. Определяется активное E_a (пассивное E_p) давление грунта на стенку с учетом разгружающего действия контрфорсов [2].

4. Выполняется статический расчет НДС «грунтовая среда – шпунтовая стенка» с учетом жесткостных параметров (площадь F_i и момент инерции I_i поперечного сечения конструкции);

5. Определяются оптимальные параметры контрфорсов в заданных геологических и эксплуатационных условиях.

Расчетная схема конструкции представлена на рисунке 2.

Для оценки влияния величины ширины ребер жесткости на НДС системы «грунтовая среда – сооружение» выполнены расчеты с варьируемыми значениями ширины ребра b и постоянными параметрами $q = 0$ кПа, $H_2 = 8,5$ м, $d = 17$ м при шаге ребер жесткости S , равном 2,4 м и 3 м. Ширина ребер жесткости принята кратной ширине одной шпунтовой сваи. Относительная ширина ребра жесткости рассматривалась как

отношение $\frac{d}{b} = (9,4; 7,08; 5,66; 4,7; 4,05; 3,54; 3,15)$.

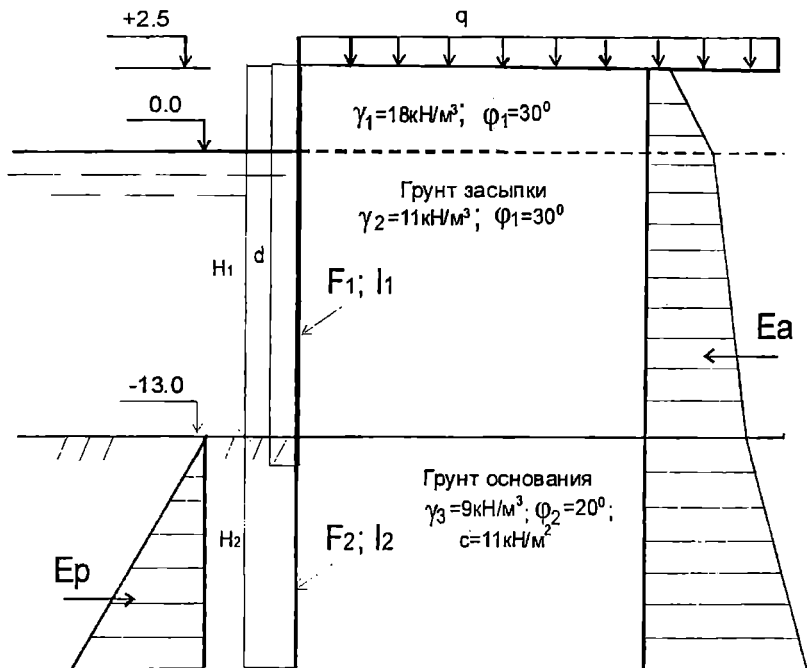


Рис. 2. Расчетная схема конструкции

В результате исследований получена зависимость перемещения верха стенки от ширины ребра жесткости (рис. 3), из которой видно, что изменение значений перемещения верха стенки как при увеличении ширины ребра жесткости, так и при изменении шага ребер жесткости не превышают 2 см. Таким образом, на выбор оптимального шага контрфорса влияет материалоемкость контрфорсов.

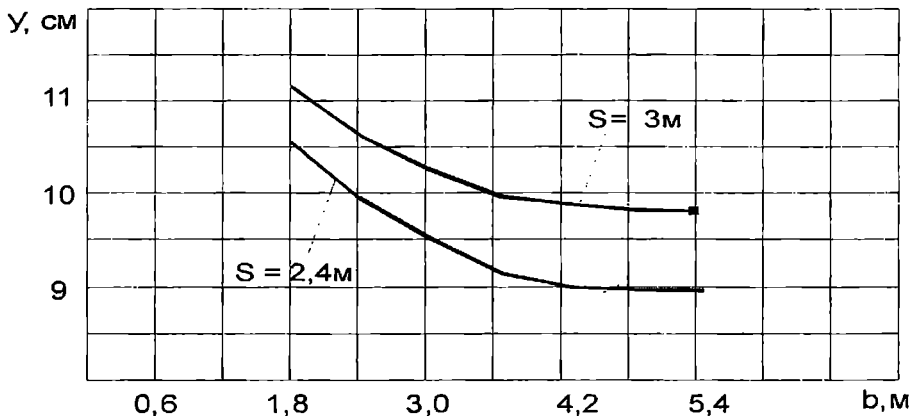


Рис. 3. Зависимость перемещения верха стенки от ширины ребра при шаге ребер 2,4 м и 3 м

Материалоемкость контрфорсов на 100 м длины причала при шаге 3 м изменяется от 194 т (при ширине 1,8 м) до 582 т (при ширине 5,4 м), а при шаге 2,4 м от 242 т до 726 т. Следовательно, величины оптимальной ширины и шага контрфорса необходимо выбрать такой, чтобы новое конструктивное решение шпунтовой стенки было конкурентоспособным традиционным решениям.

Для изучения влияния глубины погружения лицевой стенки на НДС сооружения рассматривалось относительное погружение лицевой стенки как отношение $\frac{H_2}{H_1} = (0,55; 0,61; 0,68)$, где H_2 – глубина

погружения лицевой стенки ниже уровня дна, H_1 – высота стенки выше уровня дна, равная 15,5 м, $q = 40$ кПа, $b = 3$ м, $d = 17$ м, $S = 3$ м. На основе результатов моделирования тонкой стенки получены распределения усилий и деформаций для трех форм контрфорса. На рисунке 4 представлены распределения усилий и деформаций в стенке при прямоугольной форме контрфорса.

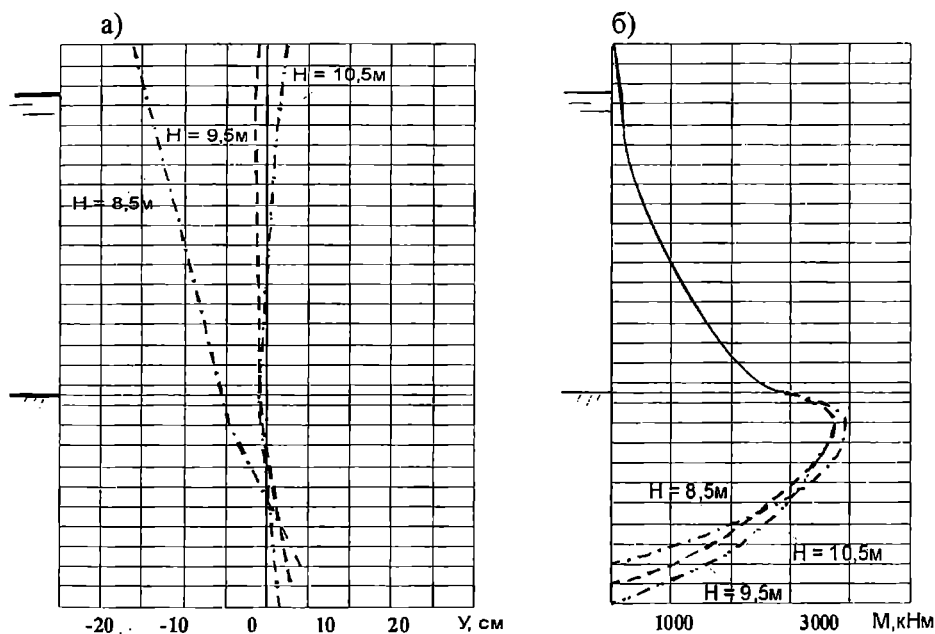


Рис. 4. Схемы к расчету стенки при изменении глубины забивки лицевой стенки:

- а) эпюры перемещений стенки;
- б) эпюры изгибающих моментов в стенке

Сопоставление полученных эпюр показало:

- при глубине погружения в грунт основания на $0,55H$ и $0,61H$ стенка претерпевает допусаемые деформации в сторону акватории; при

глубине погружения в грунт основания на 0,68Н происходит смена знака значения перемещений и стенка наклоняется уже к грунту засыпки, что свидетельствует о переаглублении стенки в грунт основания;

- зависимость между горизонтальными смещениями и глубиной погружения стенки нелинейная;

- местоположение максимальных ординат эпюры изгибающих моментов при увеличении заглубления стенки остается постоянным в зоне нижнего конца контрфорса;

- величина максимального изгибающего момента при увеличении глубины забивки лицевой стенки уменьшается.

Для других форм контрфорса приведенные эпюры перемещений и изгибающих моментов отличаются в количественном отношении в пределах 3%.

На НДС системы «грунтовая среда – сооружение» большое влияние оказывает высота контрфорса. При моделировании рассматривалась относительная высота контрфорса как отношение $\frac{d}{H_1} = (0,84;$

$0,97; 1,1)$, где d – высота контрфорса, H_1 – высота стенки выше уровня дна. В результате моделирования были получены эпюры перемещения стенки и изгибающих моментов в стенке, представленные на рисунке 5.

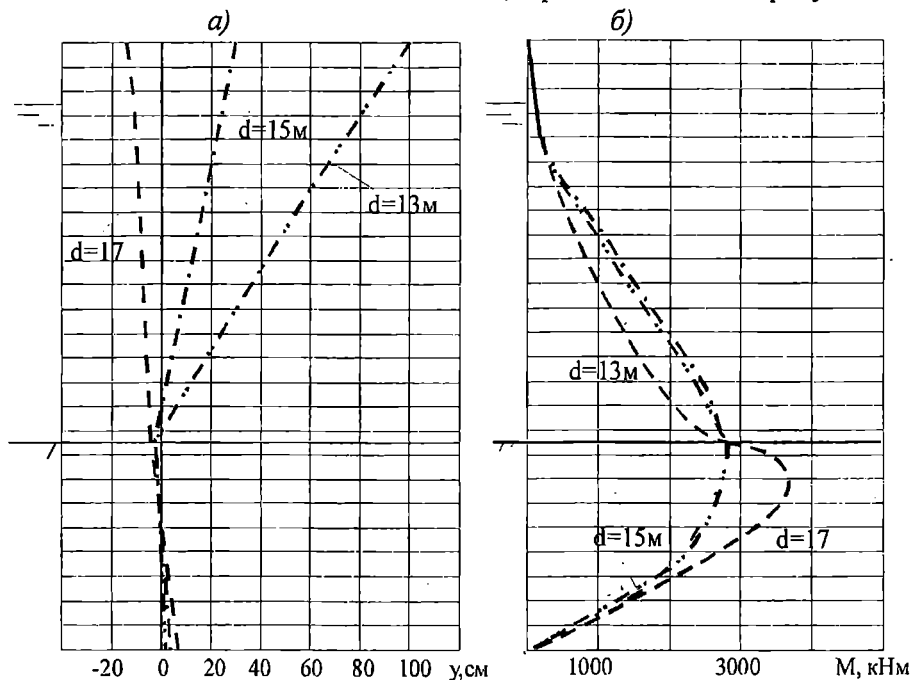


Рис. 5. Схемы к расчету стенки при изменении длины контрфорса:
 а) эпюры перемещений стенки;
 б) эпюры изгибающих моментов в стенке

Анализ полученных эпюр показал, что:

- при высоте контрфорса 0,84Н и 0,97Н происходит перемещение стенки на грунт, а при высоте контрфорса 1,1Н от грунта;
- соблюдение допускаемых деформаций наблюдается при высоте контрфорса (1,0 ÷ 1,15)Н;
- максимальные усилия в стенке находятся в зоне нижнего конца контрфорса при высоте контрфорса 1,1Н и на уровне дна при высоте контрфорса 0,84Н и 0,97Н;
- наибольшие значения максимальных изгибающих моментов соответствуют стенке, в которой высота контрфорса равна 1,1Н, т.е. контрфорс заглублен в грунт основания на 1,5 м.

При исследовании взаимодействия грунтовой среды со шпунтовой стенкой рассматривались три формы контрфорса – прямоугольная, трапецидальная с расширением сверху, трапецидальная с расширением книзу. Особенностью расчета стенки с различными формами контрфорса является изменение значений момента инерции (I) и площади поперечного сечения (F) по высоте стенки. Стенка с прямоугольной формой контрфорса имеет постоянные значения $I = 0,0489 \text{ м}^4$ и $F = 0,0421 \text{ м}^2$ по высоте контрфорса. Стенка с трапецидальной формой контрфорса с расширением книзу имеет в верхнем сечении контрфорса $I = 0,042 \text{ м}^4$ и $F = 0,0324 \text{ м}^2$, а в нижнем сечении $I = 0,053 \text{ м}^4$, $F = 0,0517 \text{ м}^2$. Стенка с трапецидальной формой контрфорса с расширением сверху имеет в верхнем сечении контрфорса $I = 0,053 \text{ м}^4$, $F = 0,0517 \text{ м}^2$, а в нижнем сечении $I = 0,042 \text{ м}^4$ и $F = 0,0324 \text{ м}^2$.

Для определения напряжений в элементах рассматривается поперечное сечение конструкции, которое представляет собой тавровое сечение, где ширина полки – шаг контрфорсов, а высота тавра – ширина контрфорса. Напряжения линейно изменяются по высоте сечения, образуя две зоны – растяжения и сжатия. При этом в точках на уровне центра тяжести напряжения имеют нулевые значения. Положение нейтральной линии определяется по формуле

$$z_c = \frac{F_i z_i}{F_i},$$

где F_i – площадь поперечного сечения элемента; z_i – ордината центра тяжести элемента. Максимальные напряжения возникают в наиболее удаленных точках от нейтральной линии и находятся по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I_z} y,$$

где M – максимальный момент в сечении; I_z – осевой момент инерции сечения относительно его центральной оси; y – ордината точки, в которой определяются напряжения.

Осевой момент инерции сечения относительно его центральной оси равен

$$I_z = I_1 + I_2 + F_1 a_1^2 + F_2 a_2^2,$$

где I_1, I_2 – моменты инерции элементов (соответственно в лицевой стенке и в контрфорсе) сечения относительно центральной оси ($I_1 = I_{cm} k$, где I_{ct} – момент инерции одиночной шпунтины в лицевой стенке, k – условное количество шпунтин в элементе, $I_2 = I_k k + F_k \sum a_k^2$, где I_k – момент инерции одиночной шпунтины в контрфорсе; F_k – площадь одиночной шпунтины в контрфорсе; a – расстояние от оси шпунтины в контрфорсе до центральной оси);

F_1, F_2 – площадь элемента сечения, соответственно в лицевой стенке и в контрфорсе, $F_{1(2)} = F_{cm(k)} k$, где $F_{ct(k)}$ – площадь одиночной шпунтины в лицевой стенке (контрфорсе);

a_1, a_2 – расстояние между осью лицевой стенки (контрфорса) и центральной осью.

Результаты расчетов показывают (табл. 1), что стенка с постоянными по высоте контрфорса значениями момента инерции и площади поперечного сечения, получила наименьшие перемещения стенки.

Таблица 1

Результаты исследования формы контрфорсов на работу системы «грунтовая среда – сооружение»

| Показатели | Форма контрфорса | | |
|---|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | прямоугольная | трапецеидальная с расширением книзу | трапецеидальная с расширением кверху |
| Изгибная жесткость EI в верхнем сечении, 10^6 кНм ² /м | 10,26 | 8,82 | 11,13 |
| Боковое давление грунта на стенку, кН/м | 1368 | 1355 | 1385 |
| Максимальный изгибающий момент, кНм/м | 3740 | 3750 | 3720 |
| Перемещение верха стенки, см | -1,15 | -1,36 | -1,31 |
| Напряжение в элементах: в лицевой стенке / в контрфорсе, кПа | 75,5/154,2 | 107,2/189,6 | 73,5/86 |

Наибольшие перемещения верха стенки и величины максимального момента получила шпунтовая стенка с трапецидальной формой контрфорса с расширением книзу, в которой значения момента инерции и площади поперечного сечения в верхнем сечении были меньшими.

Анализ результатов позволил сделать вывод, что учет жестко-связанных параметров конструкции на работу системы «грунтовая среда – сооружение» оказывает большее влияние, чем передаваемое боковое давление грунта на лицевую стенку.

Для изучения влияния физико-механических свойств грунта на напряженно-деформируемое состояние системы «грунтовая среда – тонкая стенка» выполнены расчеты со следующими характеристиками грунтов основания: супесь пластичная – угол внутреннего трения $\varphi = 20^{\circ}$; удельный вес $\gamma = 9 \text{ кН/м}^3$; сцепление $c = 11 \text{ кПа}$; коэффициент постели $k = 10000 \text{ кН/м}^4$; глина твердая – угол внутреннего трения $\varphi = 16^{\circ}$; удельный вес $\gamma = 8 \text{ кН/м}^3$; сцепление $c = 43 \text{ кПа}$; коэффициент постели $k = 45000 \text{ кН/м}^4$; пески мелкие – угол внутреннего трения $\varphi = 32^{\circ}$, удельный вес $\gamma = 11 \text{ кН/м}^3$, сцепление $c = 2 \text{ кПа}$, коэффициент постели $k = 80000 \text{ кН/м}^4$. В результате численного моделирования с варьируемыми значениями характеристик грунтов основания получены распределение усилий и деформаций в лицевой стенке (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчетов при различных физико-механических характеристиках грунта основания и форм контрфорса

| Форма контрфорса | Супесь пластичная | | Глина твердая | | Пески мелкие | |
|----------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| | максимальный момент М, кНм | перемещение верха стенки у, см | максимальный момент М, кНм | перемещение верха стенки у, см | максимальный момент М, кНм | перемещение верха стенки у, см |
| Прямоугольная | 3220 | 7,57 | 3010 | 6,11 | 3060 | 2,81 |
| С расширением книзу | 3240 | 7,63 | 3030 | 6,12 | 3080 | 2,89 |
| С расширением кверху | 3180 | 7,55 | 2980 | 6,14 | 3030 | 2,96 |

Сопоставление полученных данных показало, что наименьший изгибающий момент получила стенка при прочных грунтах основания (глина твердая), а наибольший – при слабых грунтах основания (супесь пластичная). Наименьшие перемещения стенка получила при песчаных грунтах основания, а наибольшие при слабых грунтах основания.

Для оценки влияния эксплуатационной нагрузки на напряженно-деформированное состояние системы «грунтовая среда – шпунтовая стен-

ка» при постоянных геометрических характеристиках конструкции и физико-механических свойств грунтов была приложена полезная эксплуатационная нагрузка 0; 20; 40 кПа.

Полученные эпюры перемещений и изгибающих моментов представлены на рисунке 6.

Анализируя полученные эпюры, можно сделать следующие выводы:

- зависимость между горизонтальными смещениями верха стенки и величиной нагрузки линейная;
- приращение изгибающего момента в любом сечении прямо пропорционально приращению нагрузки;
- местоположение максимальной ординаты эпюры изгибающих моментов при возрастании нагрузки остается постоянной;
- приращения перемещения верха стенки от приложения эксплуатационной нагрузки по сравнению с начальным перемещением незначительны.

На основании комплексного анализа исследований системы «грунтовая среда – шпунтовая стенка» и результатов моделирования при варьировании параметров конструкции выявлен оптимальный вариант конструктивного решения для шпунтовой стенки с контрфорсами, конкурентоспособный традиционным решениям при различных глубинах у причала (рис. 1).

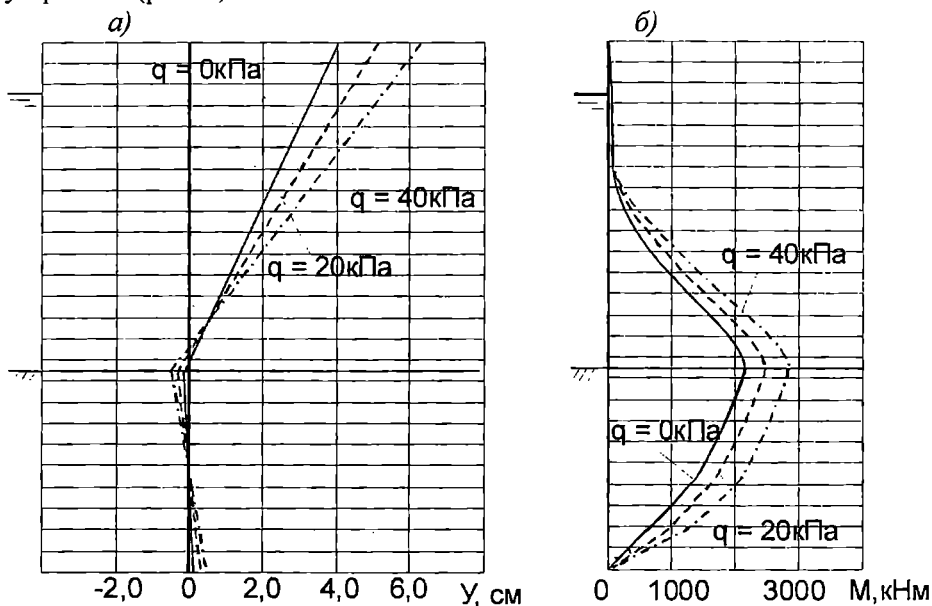


Рис. 6. Эпюры перемещений и изгибающих моментов при приложении эксплуатационной нагрузки:

а) эпюры перемещений стенки;

б) эпюры изгибающих моментов в стенке

Таблица 3

Технико-экономические показатели шпунтовой стенки с контрфорсами и традиционной конструкции на 100 м причала

| Глубина у причала, h | Вид конструкции | Максимальный момент, кНм/м | Перемещение верха стенки, см | Напряжения в элементах, МПа | Марка шпунта | Расход металла, т | Стоимость материала, тыс. евро. |
|----------------------|--|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|---------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| -9,75 | Шпунтовая стенка с контрфорсами | 2230 | -1,64 | 61,9/136 | PU12 / PU20 | 390 / 322 | 462,8 |
| | Шпунтовая стенка с анкерной в одном уровне | 538 / 538 | -2,82 | 182 | PU 32 | 786,8 | 566,5 |
| -11,5 | Шпунтовая стенка с контрфорсами | 2990 | -2,13 | 83/182 | PU12 / PU20 | 422 / 363 | 510,3 |
| | Шпунтовая стенка с анкерной в одном уровне | 724 / 902 | -4,29 | 282 | PU 32 | 1001 | 720,7 |
| -13,0 | Шпунтовая стенка с контрфорсами | 3720 | +1,83 | 103/226 | PU12 / PU20 | 458,75 / 398 | 556,9 |
| | Шпунтовая стенка с анкерной в одном уровне | 942 / 1200 | -5,1 | 317 | AZ 38 | 1090 | 872 |

Примечание: максимальный момент для заанкеренной шпунтовой стенки приведен для двух сечений: в пролете и в грунтовой заделке; марка шпунта и расход металла для шпунтовой стенки с контрфорсами приведен для двух конструктивных элементов: для лицевой стенки и для контрфорса.

Оптимальные параметры конструкции при соблюдении допустимых усилий и деформаций в сооружении: глубина погружения лицевой

стенки ниже уровня дна $H_2 = 0,61H_1$; высота контрфорса $d = 1,1H_1$; ширина контрфорса $b = \frac{d}{5,66}$; шаг $S = b$; прямоугольная форма контрфорса.

В результате расчета новой конструкции и традиционной получены технико-экономические показатели (табл. 3), из которых можно сделать вывод, что новое конструктивно-технологическое решение шпунтовой стенки конкурентоспособно с традиционным решением шпунтовой стенки с анкерровкой в одном уровне. При глубине у причала -9,75 м экономический эффект составил 18 %, при глубине -11,5 м - 29 %, при глубине -13,0 м - 36 %. Экономический эффект получен за счет того, что предложенная конструкция работает по другой схеме, что дает возможность уменьшить высоту лицевой стенки и понизить марку шпунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровский М.П., Казмирук О.В., Слободяник А.В. Усовершенствованное конструкторско-технологическое решение шпунтовой стенки повышенной жесткости // *Зб. наук. праць. Полтава, 2003. – Вип. 12. – С. 62-69.*
2. Дубровский М.П., Слободяник А.В. Исследование давления грунта на шпунтовую стенку с ребрами жесткости // *Вісник ОНМУ. – Одеса: Вид-во ОНМУ, 2005. – № 16. – С.146-156.*

Надійшла 16.05.06

ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКИХ ПРОГРЕССИВНЫХ ВОЛН МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ДОННОМ ПРЕПЯТСТВИИ

Дано приближенное решение плоской задачи о дифракции прогрессивных волн малой амплитуды на донном препятствии, которое имеет форму прямоугольника, не доходящего до свободной поверхности мелководного фарватера. Приведены результаты вычисления характеристик проходящей и отраженной волн, сопоставленные с данными экспериментов и расчетами других авторов.

Ключевые слова: дифракция волн на препятствии, коэффициент отражения, приближенное решение плоской задачи.

Приближенное решение гидродинамической задачи о дифракции регулярного волнения малой амплитуды на подводном волноломе, который размещен на дне мелководного фарватера, приведено в [1]. Для получения приближенного решения в [1] применена своеобразная квазилинеаризация граничного условия на свободной поверхности. Ее суть состоит в следующем. Область определения искомого потенциала скоростей дифракционного волнового движения $w = u + iv$ с помощью конформного преобразования трансформируется в полосу $(-\infty < x < \infty, -H \leq y \leq 0)$ плоскости $z = x + iy$ (рис.1). Отметим, что для удобства использования стандартных результатов теории функций комплексного переменного в настоящей статье направление вертикальных осей всюду заменено на противоположное принятому в статье [1]. Необходимые изменения сделаны во всех промежуточных и конечных результатах, полученных в [1].

Отобразим верхнюю полуплоскость Z_1 сначала на полосу с вырезом в плоскости w . Соответствия точек в плоскостях w и Z_1 таковы

$$w = -\infty + iv \Leftrightarrow z_1 = 0; \quad w = +\infty + iv \Leftrightarrow z_1 = \infty; \quad w = \frac{l}{2} - iH \Leftrightarrow z_1 = 1. \quad (1)$$

По формуле Кристоффеля – Шварца [2]

$$w(z_1) = C \int_{b_0}^{z_1} \frac{(\zeta - b_3)^{1/2} (\zeta - b_4)^{1/2} d\zeta}{(\zeta - b_2)^{1/2} (\zeta - 1)^{1/2} \zeta} + C_1. \quad (2)$$

При обходе точки $z_1 = 0$ вдоль полуокружности большого радиуса соответствующий образ в плоскости w переходит на $+\infty$ с нижнего на верхний край полосы. Поэтому

$$Hi = C \oint_{(D'B')} \frac{(\zeta - b_3)^{1/2} (\zeta - b_4)^{1/2} d\zeta}{(\zeta - b_2)^{1/2} (\zeta - 1)^{1/2} \zeta} = C \int_{(D'B')} \frac{d\zeta}{\zeta} = C\pi i. \quad (3)$$

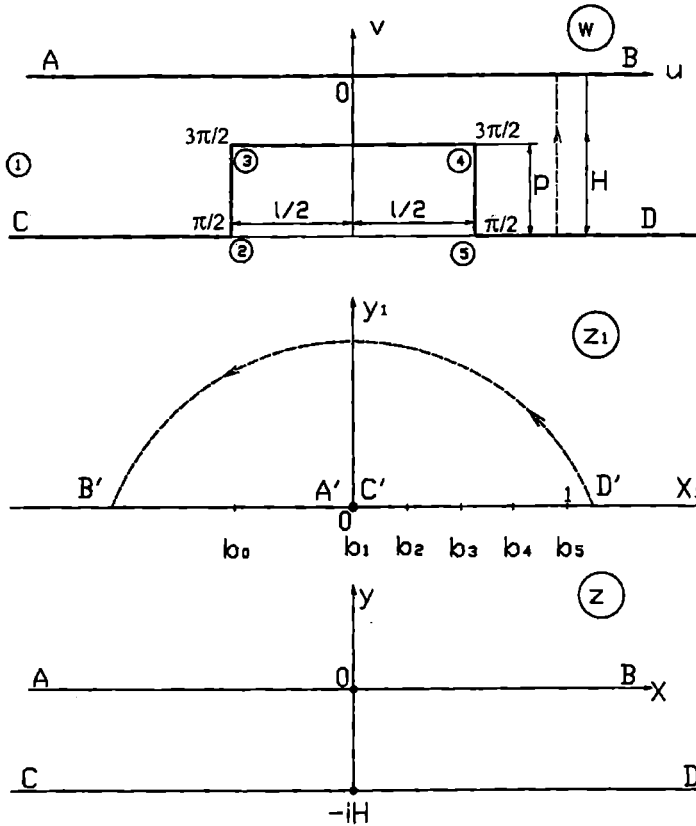


Рис.1. Конформные преобразования области потока

Так как $\lim_{|\zeta| \rightarrow \infty} \frac{(\zeta - b_3)^{1/2} (\zeta - b_4)^{1/2}}{(\zeta - b_2)^{1/2} (\zeta - 1)^{1/2}} = 1$, то $C = \frac{H}{\pi}$.

Выбором величины b_0 можно достичь, чтобы $C_1 = 0$. Итак, окончательно получаем

$$w(z_1) = \frac{H}{\pi} \int_{b_0}^{z_1} \frac{(\zeta - b_3)^{1/2} (\zeta - b_4)^{1/2} d\zeta}{(\zeta - b_2)^{1/2} (\zeta - 1)^{1/2} \zeta}. \quad (4)$$

Рассмотрим теперь отображение полосы $(-\infty < x < \infty, -H \leq y \leq 0)$ плоскости Z на верхнюю полуплоскость z_1 (рис. 1). Такое отображение осуществляется функцией

$$z_1 = -\exp\left(\frac{\pi z}{H}\right). \quad (5)$$

Композиция отображений (4) и (5) дает отображение полосы без выреза в плоскости $z = x + iy$ на полосу с вырезом в плоскости $w = u + iv$

$$w(z) = \frac{H}{\pi} \int_{b_0}^{-\exp\left(\frac{\pi z}{H}\right)} \frac{(\zeta - b_3)^{1/2} (\zeta - b_4)^{1/2} d\zeta}{(\zeta - b_2)^{1/2} (\zeta - 1)^{1/2} \zeta}, \quad (6)$$

$$\frac{dw(z)}{dz} = \frac{\left[\exp\left(\frac{\pi z}{H}\right) + b_3\right]^{1/2} \left[\exp\left(\frac{\pi z}{H}\right) + b_4\right]^{1/2}}{\left[\exp\left(\frac{\pi z}{H}\right) + b_2\right]^{1/2} \left[\exp\left(\frac{\pi z}{H}\right) + 1\right]^{1/2}}. \quad (7)$$

Заметим, что $\lim_{z \rightarrow +\infty} \frac{dw}{dz} = 1$, что естественно, поскольку вертикальный размер вне препятствия полосы $(-H \leq v \leq 0)$ в плоскости и всей полосы $(-H \leq y \leq 0)$ Z плоскости одинаков. Из тех же соображений следует, что

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \frac{dw}{dz} = \frac{(-b_3)^{1/2} (-b_4)^{1/2}}{(-b_2)^{1/2} (-1)^{1/2}} = \sqrt{\frac{b_3 b_4}{b_2}} = 1. \quad (8)$$

Следующая проблема связана с определением значений b_2, b_3, b_4 .

Заметим, что на участке 4-5 (рис. 1) приращение w равно $-ip$. Следовательно,

$$\frac{H}{\pi} \int_{b_4}^{b_5} \frac{(\zeta - b_3)^{1/2} (\zeta - b_4)^{1/2} d\zeta}{(\zeta - b_2)^{1/2} (\zeta - 1)^{1/2} \zeta} = -ip, \quad b_5 = 1. \quad (9)$$

Учитывая, что $\zeta - 1 < 0$, имеем

$$\frac{H}{\pi i} \int_{b_4}^1 \frac{(\zeta - b_3)^{1/2} (\zeta - b_4)^{1/2} d\zeta}{(\zeta - b_2)^{1/2} (1 - \zeta)^{1/2} \zeta} = -ip. \quad (10)$$

Поэтому

$$\int_{b_4}^1 \frac{(\zeta - b_3)^{1/2} (\zeta - b_4)^{1/2} d\zeta}{(\zeta - b_2)^{1/2} (1 - \zeta)^{1/2} \zeta} = \frac{\pi p}{H}. \quad (11)$$

Подобным же образом получим еще два уравнения

$$\int_{b_3}^{b_4} \frac{(\zeta - b_3)^{1/2} (b_4 - \zeta)^{1/2} d\zeta}{(\zeta - b_2)^{1/2} (1 - \zeta)^{1/2} \zeta} = \frac{\pi l}{H}, \quad (12)$$

$$\int_{b_2}^{b_3} \frac{(b_3 - \zeta)^{1/2} (b_4 - \zeta)^{1/2} d\zeta}{(\zeta - b_2)^{1/2} (1 - \zeta)^{1/2} \zeta} = \frac{\pi p}{H} \quad (13)$$

Итак, для определения трех констант b_2, b_3, b_4 имеется три интегральных уравнения (11), (12), (13) и одно соотношение (8). Такая ситуация обычно возникает при использовании интеграла Кристоффеля – Шварца. Для определения констант рекомендуется принять приближенный метод решения системы интегральных уравнений (11), (12), (13) типа, описанного в [3], а (8) применять при этом в качестве контрольного соотношения.

Если константы b_2, b_3, b_4 определены, легко установить соответствие точек (u_0, v_0) прямоугольного контура в W плоскости и точек $(x_0, -H)$, принадлежащих образу прямоугольного контура в плоскости Z . Отметим координаты точек, принадлежащих стороне 2 – 3 квадрата в плоскости W верхними индексами I. Эти же индексы сохраним для координат образов этих точек на плоскостях Z_1 . Аналогично координаты точек, принадлежащих стороне 3 – 4, отметим верхними индексами II, а принадлежащих стороне 4 – 5 – верхними индексами III.

Заметим, что на участке 4 – 5 приращение W при переходе от точки $w = \frac{l}{2} + iv_0^{\text{III}}$ к точке $w = \frac{l}{2} - iH$ составляет $-i(H + v_0^{\text{III}})$.

Значит, аналогично (9)

$$-\frac{Hi}{\pi} \int_{b_4}^{x_1^{\text{III}}} \sqrt{\frac{(\zeta - b_3)(\zeta - b_4)}{(\zeta - b_2)(1 - \zeta)}} \frac{d\zeta}{\zeta} = -i(H + v_0^{\text{III}}). \quad (14)$$

Таким образом,

$$\int_{b_4}^{x_1^{\text{III}}} \sqrt{\frac{(\zeta - b_3)(\zeta - b_4)}{(\zeta - b_2)(1 - \zeta)}} \frac{d\zeta}{\zeta} = \pi \left(1 + \frac{v_0^{\text{III}}}{H} \right). \quad (15)$$

Аналогично, для участка 3-4

$$\int_{b_3}^{x_1^{\text{II}}} \sqrt{\frac{(\zeta - b_3)(b_4 - \zeta)}{(\zeta - b_2)(1 - \zeta)}} \frac{d\zeta}{\zeta} = \frac{\pi}{H} \left(u_0^{\text{II}} + \frac{l}{2} \right). \quad (16)$$

Для участка 2-3

$$\int_{b_2}^{x_1^{\text{I}}} \sqrt{\frac{(b_3 - \zeta)(b_4 - \zeta)}{(\zeta - b_2)(1 - \zeta)}} \frac{d\zeta}{\zeta} = \pi \left(1 + \frac{v_0^{\text{I}}}{H} \right). \quad (17)$$

Задавая требуемое количество абсцисс в каждой из групп $x_1^{\text{I}}, x_1^{\text{II}}$ и x_1^{III} на интервале $b_2 < x_1^{\text{I}} < b_3$; $b_3 < x_1^{\text{II}} < b_4$ и $b_4 < x_1^{\text{III}} < 1$, с помощью

интегралов (15), (16) и (17), легко найти соответствующие значения v_0^I, u_0^II и v_0^III на этих интервалах.

Затем, используя (5), легко определить соответствующие абсциссам x_1^I, x_1^II и x_1^III значения x_0^I, x_0^II и x_0^III

$$x_0^j = \frac{H}{\pi} \ln |x_1^j|, \quad j = I, II, III. \quad (18)$$

Итак, предложенная расчетная процедура позволяет легко установить взаимно однозначное соответствие координат (u_0, v_0) прямоугольного донного препятствия абсциссам $(x_0, -H)$ полосы $-H \leq z \leq 0$.

Перейдем к определению нормальных производных амплитуд косинусной Φ_c и синусной Φ_s составляющих искомого потенциала $\Phi = \Phi_c + i\Phi_s$ на образующих донного препятствия. В соответствии с условием непротекания и безотрывного обтекания

$$\frac{\partial \Phi_{c,s}}{\partial N} = -\frac{\partial \Phi_{c,s}^w}{\partial N}, \quad (19)$$

где N – нормаль к рассматриваемой образующей препятствия;

а Φ_c^w и Φ_s^w – косинусная и синусная составляющие комплексной амплитуды $\Phi^w = \Phi_c^w + i\Phi_s^w$ набегающего прогрессивного волнения с амплитудой r и частотой σ .

Амплитуды косинусной и синусной составляющих потенциала Φ^w имеют вид

$$\begin{aligned} \Phi_c^w(u, v) &= A \frac{chk(v+H)}{chkH} \sin kH, \\ \Phi_s^w(u, v) &= -A \frac{chk(v+H)}{chkH} \cos kH, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{\sigma^2}{g} = kthkH, \quad A = \frac{rg}{\sigma}.$$

Выпишем, учитывая (19) и (20), граничные условия на образующих прямоугольного препятствия.

Сторона 2-3:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_c}{\partial N} &= f_c \left(-\frac{l}{2}, -H \leq v \leq -H + p \right) = Ak \frac{chk(v+H)}{chkH} \cos \frac{kl}{2}; \\ \frac{\partial \Phi_s}{\partial N} &= f_s \left(-\frac{l}{2}, -H \leq v \leq -H + p \right) = -Ak \frac{chk(v+H)}{chkH} \sin \frac{kl}{2}. \end{aligned} \quad (21)$$

Сторона 3-4:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_c}{\partial N} &= f_c \left(-\frac{l}{2} \leq u \leq \frac{l}{2}, v = -H + p \right) = -Ak \frac{shkp}{chkH} \sin ku; \\ \frac{\partial \Phi_s}{\partial N} &= f_s \left(-\frac{l}{2} \leq u \leq \frac{l}{2}, v = -H + p \right) = Ak \frac{shkp}{chkH} \cos ku. \end{aligned} \quad (22)$$

Сторона 4-5:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_c}{\partial N} &= f_c \left(\frac{l}{2}, -H \leq v \leq -H + p \right) = -Ak \frac{chk(v+H)}{chkH} \cos \frac{kl}{2}; \\ \frac{\partial \Phi_s}{\partial N} &= f_s \left(\frac{l}{2}, -H \leq v \leq -H + p \right) = -Ak \frac{chk(v+H)}{chkH} \sin \frac{kl}{2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Применяя описанную выше процедуру отыскания соответствия точек (u_0, v_0) в плоскости w точкам $(x, -H)$ в плоскости z , легко выписать значения функций $f_{c,s}$ на соответствующих отрезках горизонтальной линии $(x, -H)$, которая является в плоскости $z = x + iy$ образом дна мелководного фарватера с прямоугольным препятствием в плоскости $w = u + iv$. Однако при этом необходимо учесть, что в соответствии с правилами конформного отображения

$$f_{c,s}(z) = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \Phi}{\partial w} \left| \frac{dw}{dz} \right|. \quad (24)$$

Для окончательного представления функции $f_{c,s}(x)$ на разных отрезках горизонтальной линии $(x, -H)$, соответствующих образующим прямоугольного препятствия, выпишем значения функции $\left| \frac{dw}{dz} \right|$ на этих отрезках.

На отрезке, соответствующем стороне 2-3

$$\left| \frac{dw}{dz} \right| = \sqrt{\frac{\left[b_3 - \exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) \right] \left[b_4 - \exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) \right]}{\left[\exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) - b_2 \right] \left[1 - \exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) \right]}} \quad (25)$$

На отрезке, соответствующем стороне 3-4

$$\left| \frac{dw}{dz} \right| = \sqrt{\frac{\left[\exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) - b_3 \right] \left[b_4 - \exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) \right]}{\left[\exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) - b_2 \right] \left[1 - \exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) \right]}} \quad (26)$$

На отрезке, соответствующем стороне 4-5

$$\left| \frac{dw}{dz} \right| = \sqrt{\frac{\left[\exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) - b_3 \right] \left[\exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) - b_4 \right]}{\left[\exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) - b_2 \right] \left[1 - \exp\left(\frac{\pi x}{H}\right) \right]}} \quad (27)$$

С учетом оговоренного изменения направления вертикальных осей приведем расчетные формулы из [1].

Имеем

$$B_c(k) = 2 \int_0^{\ln|b_2|} f_c(x) \sin kx dx; \quad B_s(k) = 2 \int_0^{\ln|b_2|} f_s(x) \cos kx dx, \quad (28)$$

$$a_{c,s}(k) = \frac{B_{c,s}(k)}{k \left(\frac{\sigma^2}{g} shkH - kchkH \right)}. \quad (29)$$

Коэффициент отражения набегающих волн R и коэффициент их прохождения T соответственно равны

$$\begin{aligned} R(k) &= |a_c(k) - a_s(k)|, \\ T(k) &= |a_c(k) + a_s(k)|. \end{aligned} \quad (30)$$

Алгоритм определения коэффициентов отражения и прохождения в соответствии с решением, предложенным в [1] и конкретизированным в настоящей статье, позволил провести систематические расчеты эффективности волнолома прямоугольной формы для различных соотношений его линейных размеров и частот набегающего волнения. На рис. 2 в качестве примера приведены результаты расчета зависимости коэффициента отражения R от частотного параметра kH для подводного препятствия прямоугольной формы, имеющего следующие

соотношения линейных размеров $\frac{p}{H} = 0,5$, $\frac{B}{H} = 2$ (кривая 1). Кривая

2 на этом графике демонстрирует результаты расчета R по точному решению *Mei* [4], а точки соответствуют экспериментальным результатам Бендиаковской [5].

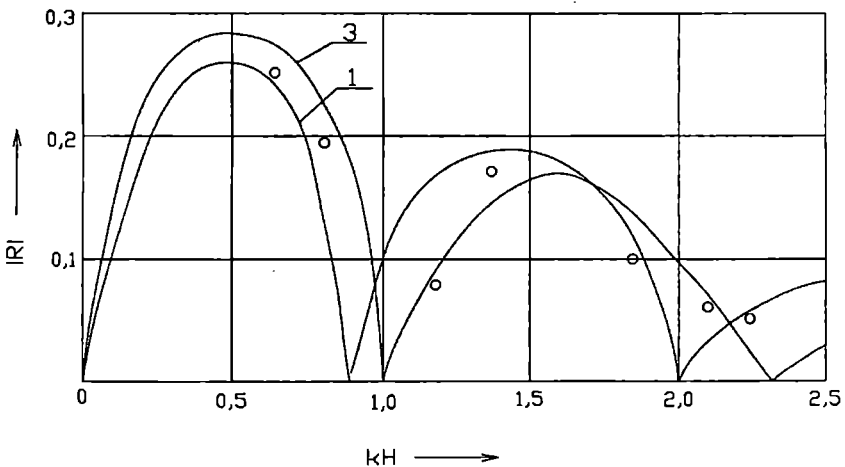


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения $|R|$ от волнового числа

ЛИТЕРАТУРА

1. Федорова Е. Ю. Приближенный метод решения дифракционных задач плоской теории волн // *Вісник ОНМУ. – Одеса: Вид-во ОНМУ, 2005. – № 18. – С. 49-56.*
2. Привалов И. И. Введение в теорию функций комплексного переменного. Изд. XIII. – М.: Наука, 1984. – 432 с.
3. Воробьев Ю. Л., Тонюк В. И. Приближенное решение одной краевой задачи гидродинамической теории качки // *Вісник ОДМУ. – Одеса: ОДМУ, 2001. – № 6. – С. 3-17.*
4. Mei C.C., Black J.L. Scattering of surface waves by rectangular obstacles in waters of finite depth // *Journal of Fluid Mechanics, 1969. – Vol. 38. – P.499-511.*
5. Bendykowska G. Experiments of wave propagation over submerged and impermeable obstacles // *Intern. Rep. Inst. Hydroengineering, Gdansk, 1976. – 19 p.*

Надійшла 15.05.06

МЕТОД ЛОКАЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ КОРНЕВЫХ ШАРНИРОВ СТРЕЛОВЫХ СИСТЕМ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ

Рассмотрены основные положения ремонта корневых шарниров стреловых систем порталных кранов без демонтажа стреловой системы.

Ключевые слова: порталные краны, ремонт шарнирных соединений, компенсационное усилие.

Парк порталных кранов морских портов Украины представлен, в основном, кранами фирмы Кранбау-Эберсвальде (Германия). Свыше 60% от общей численности – это краны типа «Сокол», «Кондор» и «Альбатрос» с шарнирно-сочлененной стреловой системой.

Затраты на ремонт несущих элементов металлоконструкций превышают 50% от общих затрат на ремонт порталных кранов.

По технологическим особенностям наиболее дорогостоящими работами являются ремонты шарнирных соединений стреловых систем, требующие локальной разгрузки металлоконструкций, если ремонт выполняется без демонтажа стреловой системы.

Традиционные методы ремонта шарнирных соединений стреловых систем предполагают демонтаж стреловой системы и выполнение ремонта на нулевой отметке. Такой ремонт характеризуется высокими трудоёмкостью, стоимостью и продолжительностью. Обязательным условием при таком ремонте является наличие свободной площадки на причале для демонтажа стреловой системы. При отсутствии такой площадки кран перегоняют в тыл, что требует дополнительных затрат и времени.

В настоящей статье рассматривается технология ремонта шарнирных соединений без демонтажа стреловой системы.

Рассмотрим основные положения технологии ремонта корневых шарниров стреловых систем порталных кранов без демонтажа стреловой системы.

В связи с тем, что собственная масса элементов стреловой системы достигает 50 т и более, для проведения ремонта или замены шарниров необходимо обеспечить локальную разгрузку участков металлоконструкций. Распределение нагрузок в системе осуществляют графо-аналитическим методом, для чего производят расчет нагрузок в области корневых шарниров от собственных масс элементов при положении стреловой системы в смазочном положении (рис. 1).

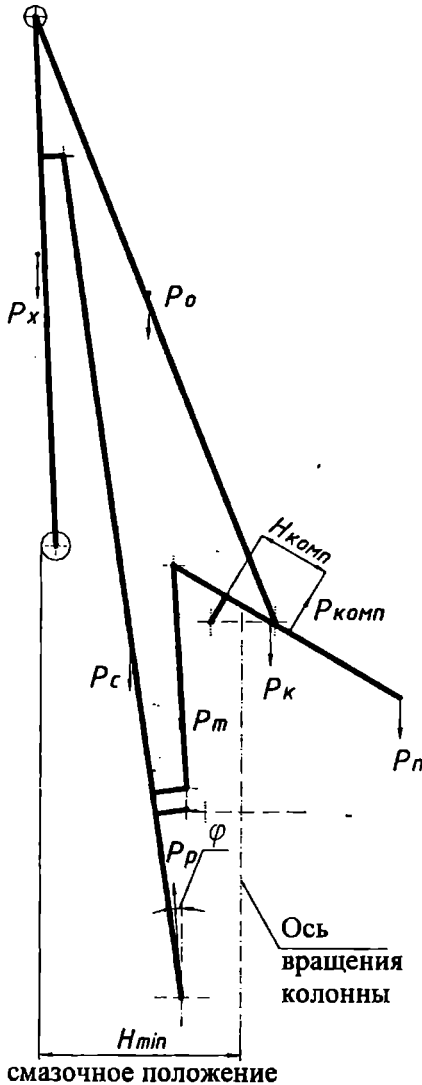


Рис. 1. Схема для расчета нагрузок, действующих на оси корневых шарниров:

$P_x, P_o, P_n, P_k, P_m, P_c$ – нагрузки от собственных масс хобота, оттяжки, противовеса, коромысла, тяги и стрелы соответственно;

P_p – результирующая сила; $P_{комп}$ – компенсационное усилие;

$H_{комп}$ – плечо компенсационного усилия.

Результирующая сила P_p проходит через оси шарниров и направлена вверх под углом φ к вертикали. Это обусловлено тем, что подвижный противовес, имея массу M_n и плечо H_n в смазочном положении перетягивает шарнирно-сочлененную укосину с жесткой оттяжкой. При этом в основании корня стрелы возникает обратный зазор.

Аналитически выполняется расчет усилия $P_{\text{комп}}$, необходимого для компенсации момента от подвижного противовеса. В зависимости от места приложения и величины $P_{\text{комп}}$ определяется условие равновесия. Разгрузка системы может быть обеспечена за счет установки домкратов по специальной технологии или застропки и подъема противовеса другим краном.

Для примера выполним расчет компенсационного усилия $P_{\text{комп}}$ для портального крана «Сокол» (рис. 2). Результирующая сила P_p проходит через оси шарниров, составляет 83,39 т и направлена вверх под углом $\varphi = 4,3^\circ$ к вертикали. Подвижный противовес, имея массу $M_n = 15,5$ т и плечо $H_n = 5,7$ м в смазочном положении приподнимает стреловую систему вверх относительно корневых шарниров. Компенсационное усилие можно реализовать, используя домкраты.

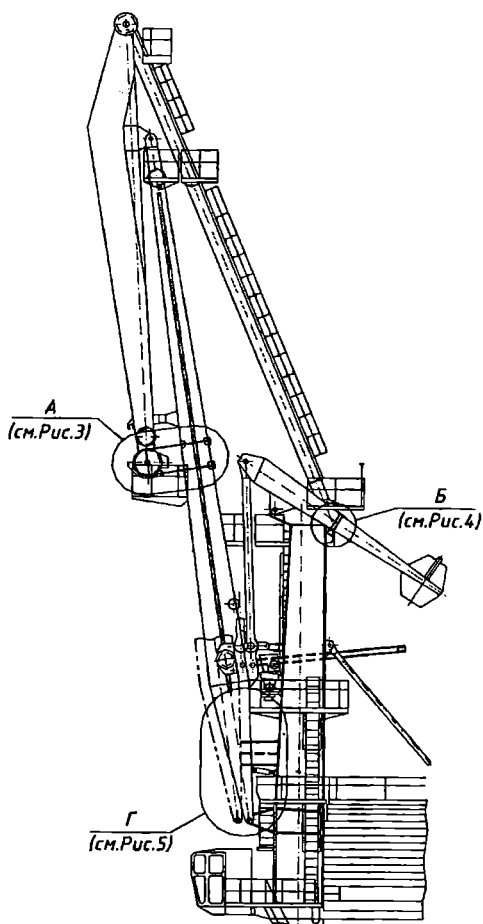


Рис. 2. Схема разгрузки шарниров «Корень стрелы/колонна» с выводом корня стрелы

При достижении величины $P_{\text{комп}}$ домкратами, установленными на кронштейнах задней стенки колонны, она составит $P_{\text{комп}} = 34,6$ т.

Нагрузку прикладывают двумя гидродомкратами грузоподъемностью по 20 т каждый.

Методика компенсации напряженно-деформированного состояния металлоконструкции в области корневых шарниров и вывод корня стрелы предполагает выполнение следующих операций:

- устанавливают стреловую систему крана в смазочное положение;
- закрепляют оголовок хобота в области концевых блоков к укосине (рис. 2, 3) при помощи канатов, деревянных прокладок. Натягивают канаты талрепами

A(см. рис. 2)

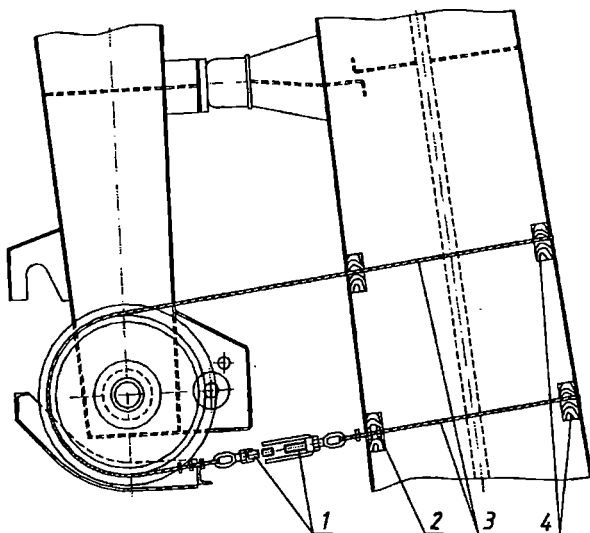


Рис. 3. Схема раскрепления хобота:

- 1 – талрепы;*
- 2 – зажимы;*
- 3 – канаты;*
- 4 – деревянные прокладки*

- с целью компенсации момента от подвижного противовеса устанавливают гидродомкраты на задней стенке колонны (рис. 2, 4);
- с целью фиксации корня стрелы, а также разгрузки шарниров в горизонтальной плоскости, производят установку проушин и кронштейнов для талрепов (рис. 2, 5) на колонну и стрелу согласно расчетным размерам (рис. 5);

- с целью исключения защемления зубчатой рейки в механизме изменения вылета стрелы, в момент вывода, растормаживают механизм изменения вылета.
- увеличивая нагрузку от домкратов (рис. 4), производят разгрузку шарниров в вертикальной плоскости.

В (см. рис. 2)

Ось с блоками и жесткая оттяжка условно не показаны

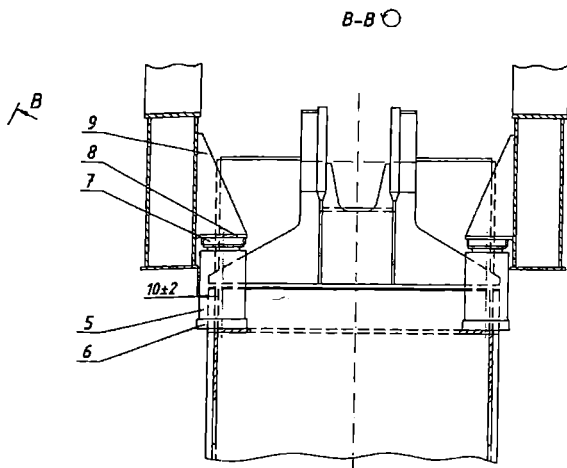
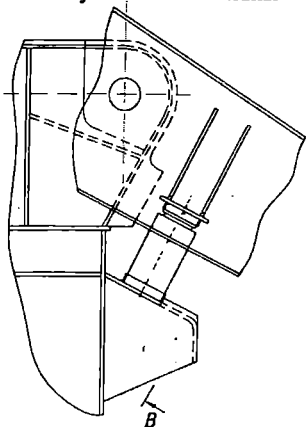


Рис. 4. Схема установки кронштейнов и домкратов для разгрузки шарниров в вертикальной плоскости:

- 5 – гидродомкраты;*
- 6, 7 – страховочные кольца для домкратов;*
- 8, 9 – элементы упорных кронштейнов*

- используя талрепы (рис. 5), производят разгрузку шарниров в горизонтальной плоскости;
- демонтируют шарниры;
- осуществляют вывод корня стрелы из кронштейнов колонны с помощью талрепов (рис. 5);
- обеспечивают фиксацию стрелы к колонне на период ремонта или замены (рис. 5).

После выполнения ремонтных работ монтаж шарниров осуществляют в обратной последовательности.

Замена шарнирных соединений стреловой системы крана без демонтажа обеспечивает значительное снижение затрат на ремонт портального крана за счет уменьшения таких трудоемких операций как демонтаж-монтаж стреловой системы и перегон крана в тыл для ремонта.

Экономическая эффективность от применения предложенной технологии определяется за счет снижения простоя крана на ремонте в 10-15 раз, повышения коэффициента использования крана, снижения

затрат на ремонт, экономии причальных площадей для демонтажа стреловой системы.

Г (см. рис. 2)

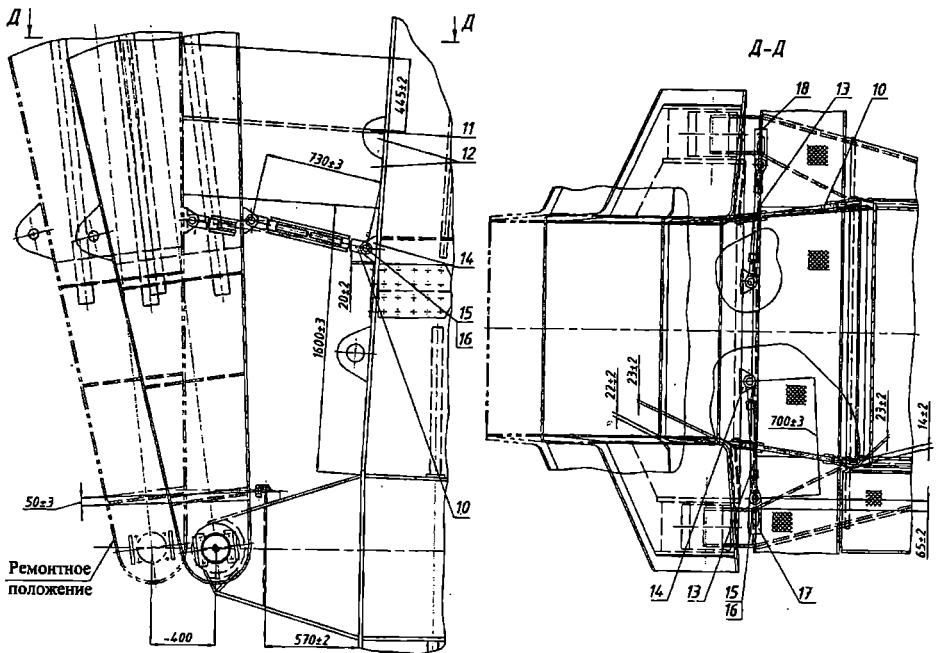


Рис. 5. Разгрузка шарниров в горизонтальной плоскости и вывод корня стрелы:

10, 13 – талрепы;

11, 12 – детали для фиксации стрелы к колонне;

14-17 – оси проушины и кронштейны для установки талрепов

Предложенная технология ремонта порталных кранов внедрена в морских и речных портах Украины, показала высокую эффективность при значительной экономии денежных средств по сравнению с традиционными методами ремонта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гохберг М.М. Справочник по кранам: В 2 т. Т 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И. Е. Звягин и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.
2. Инструкция по эксплуатации порталных кранов «Сокол» грузоподъемностью 16/20/32 т постройки 1971-1974 гг. М., ЦРИА «Морфлот», 1979. – 148 с.
3. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т. 1. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 728 с.
4. Дукельский А.И. Портовые и судовые грузоподъемные машины. – Л.: Морской транспорт 1960. – 516 с.
5. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия (Доп. Разд. 10. Прогибы и перемещения) / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 8 с.
6. Кох П.И. Производство, монтаж, эксплуатация и ремонт подъемно-транспортных машин. – К.: Вища школа, 1977. – 352 с.

Надійшла 26.05.06

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОБНОВЛЕНИЯ ПАРКА ПОРТОВЫХ КРАНОВ В МОРСКИХ ПОРТАХ УКРАИНЫ

Приведен анализ состояния и перспективные направления обновления парка портовых кранов в морских портах Украины.

Ключевые слова: порталные краны, мобильные краны, обновление парка кранов.

В морской отрасли создан Реестр парков порталных кранов морских портов Украины и с 2002 по 2006 годы проводится мониторинг с использованием Информационно-аналитической системы (ИАС) «Портальные краны Украины».

Система позволяет проводить анализ изменения структуры парка портовых кранов, их технического состояния, интенсивности использования, списания старых и обновления новыми типами машин.

Парк портовых кранов морских портов состоит из 564 порталных кранов, 7 мобильных кранов «Лиебхерр» и 23 перегружателей.

Структура парка портовых кранов по типам машин приведена на рис. 1.

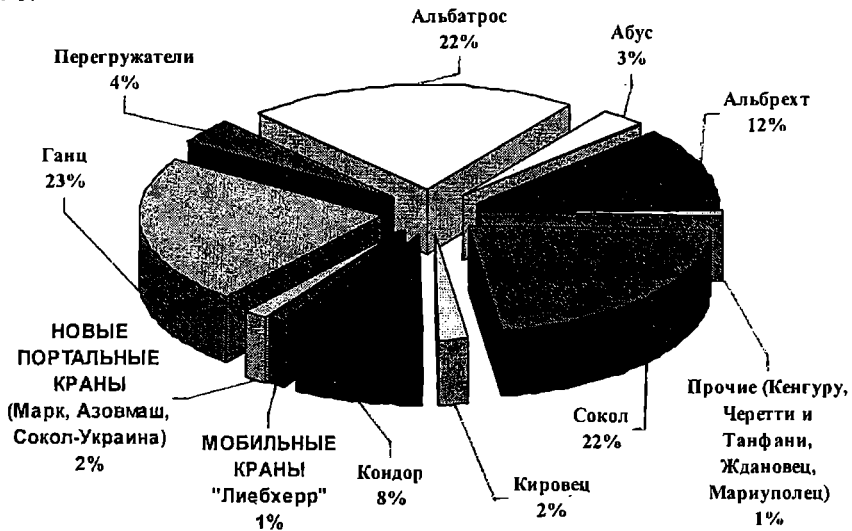


Рис. 1. Структура портовых кранов морских портов Украины по типам

Анализ структуры парка портовых кранов показывает, что 67% парка кранов представлены фирмой «Кранбау Эберсвальде» (Германия), 23% фирмой «Ганц», и 6% другими производителями перегрузочной техники.

Общий износ парка кранов превышает 95%. В основном это машины морально устаревших конструкций с шарнирно-сочлененной стреловой системой, возраст некоторых из них достигает 50 лет.

С учетом современных тенденций в краностроении зарубежные порты, в том числе и российские (Санкт-Петербург, Новороссийск, Восточный, Дудинка и другие), на протяжении последних 15 лет оснащаются принципиально новыми типами портовых кранов – мобильными.

Мобильные краны имеют меньшую металлоемкость, обладают возможностью быстрого перемещения по территории порта собственным ходом, высокую мобильность. В зависимости от подхода судов к причалам порта и технологий перегрузочных работ, мобильный кран может перемещаться с причала на причал, работать в тылу на складских территориях, что существенно снижает необходимое число кранов в порту за счет полного использования уже имеющейся перегрузочной техники.

Если для мобильных кранов возникают ограничения их применения на существующих причалах из-за невозможности проезда железнодорожных вагонов под краном, то в таких случаях применяют порталные мобильные краны, у которых основная металлоконструкция (поворотная колонна, стрела, противовес) установлена на портале и под ним возможен проезд железнодорожных вагонов.

Конструкция портала позволяет установку мобильного порталного крана на подкрановый путь со стандартной колеёй 10,5 метров, а также дает возможность быстро перевести кран на пневмоколесный ход, что обеспечивает его самостоятельное перемещение на другой причал, тыл и т.д. Такие краны уже применяются в портах Туапсе, Новороссийск и др.

Некоторые украинские порты начали обновление мобильными кранами, например: порты Одесский (3 ед.), Южный (4 ед.). Однако большинство портов продолжают оснащаться порталными кранами морально устаревших конструкций с шарнирно-сочлененной стреловой системой, имеющими большую металлоемкость, энергоемкость, ограниченную мобильность. Имеет место также большой процент обновления порталными кранами б/у, что только повышает степень износа парка кранов.

Обновление парка порталными кранами оптимально только в случае их установки на определенные причалы со стабильно-прогнозируемыми грузопотоками в связи с большой проблематичностью перевода их на новое место работы в случае утраты грузопотока.

Для сравнения, коэффициент использования, равный 0,8 и выше, порталный кран достигает, если он установлен на причальной ветке подкранового пути и подход судов к этому причалу регулируется и осуще-

Таблица

| Характеристика | Портальные краны | | | | Мобильные краны | | | |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Сокол KRANBAU EBERS- WALDE | Кондор KRANBAU EBERS- WALDE | Марк - 45 KONE- CRANES | LPS - 250 LIEBHERR | HSK - 170 EG GOTT- WALD | LHM - 150 LIEBHERR | LHM - 250 LIEBHERR | LHM - 320 LIEBHERR |
| | Грузоподъемность, крюк (вылет), т: | | | | | | | |
| до 16 м | 32 | 40 | 40 | 64 | 45 | 40 | 64 | 104 |
| до 25 м | 20 | 40 | 40 | 48 | 42 | 21 | 48 | 64 |
| до 32 м | - | 32 | 40 | 33 | 28 | 14 | 33 | 45 |
| до 34 м | 16 | - | 38 | 30 | 26 | - | 30 | 41 |
| до 40 м | - | - | 35 | 25 | 20 | - | - | 33 |
| до 45 м | - | - | 32 | - | - | - | - | 29 |
| Грейфер (вылет), т: | | | | | | | | |
| до 30 м | 16 | 16 | - | - | 25 | 16 | 26 | 35 |
| до 32 м | - | 16 | - | - | 22 | 12 | 23 | 32 |
| до 34 м | 16 | - | - | - | 20 | - | - | - |
| до 40 м | - | - | - | 18 | 16 | - | 18 | 23 |
| до 43 м | - | - | - | - | - | - | - | 21 |
| до 45 м | - | - | 18 | - | - | - | - | - |
| Масса крана, т | 238 | 371 | 464 | 265 | 300 | 150 | 230 | 320 |
| Удельная масса крана, отнесенная на 1 т груза на крюке, т | 7,44 | 9,27 | 11,6 | 4,1 | 4,76 | 3,6 | 3,67 | 3,0 |
| Вертикальная нагрузка на причал от одного ходового колеса, т | 22,8 | 25,5 | 26,2 | 22,0 | 30,0 | 4,6 | 4,7 | 5,7 |
| Скорости: | | | | | | | | |
| подъема, м/мин.; | 63,0 | 40,0 | 32,0/63,0 | 90/18 | 70 | 70 | 90 | 90 |
| поворота, об/мин.; | 1,6 | 1,0 | 1,6 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,4 | 1,6 |
| вылета, м/мин.; | 63,0 | 40,0 | 63,0 | 40,0 | 45,0 | 45,0 | 32,0 | 40,0 |
| передвижения км/ч | 1,9 | 1,2 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 2,4 | 5,4 | 5,4 |

ствляется в минимальные сроки. Мобильный кран, перемещаясь с причала на причал, достигает таких же показателей коэффициента использования даже при нерегулярном подходе судов к одному и тому же причалу, т.е. обладает возможностью быть в нужное время в нужном месте.

В таблице приведены основные технические характеристики порталных и мобильных кранов.

Анализ данных таблицы показывает, что мобильные краны обладают меньшей общей массой, имеют лучшие показатели по грузоподъемности, вылету, скоростям работы и меньшую удельную массу, отнесенную на 1 тонну максимального груза на крюке.

К дополнительным преимуществам мобильных кранов можно отнести:

- снижение времени и стоимости монтажа в 8-10 раз (если стоимость монтажа порталного крана составляет 10-15% заводской стоимости крана и сроки монтажа составляют несколько месяцев, то срок монтажа мобильного крана укрупненными узлами достигает 1,5-2 недели);
- встроенные системы диагностирования узлов и систем без остановки крана, в том числе для оценки остаточного ресурса;
- на порядок выше конструктивная плотность мощности гидропривода по сравнению с электроприводом на порталном кране;
- улучшенные условия для проведения технического обслуживания и ремонта;
- возможность значительного уменьшения габаритов при передвижении крана по порту, поскольку стрела может опускаться на причал, допускается наклон колонны при перемещениях крана в случаях негабаритов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пустовой В.Н. *Каким быть парку кранов отрасли? // Порты Украины. – 2005. – № 3.*
2. Пустовой В.Н. *Мониторинг кранового хозяйства // Порты Украины. – 2005. – № 2.*
3. Марченко В.Г., Пустовой В.Н. *Обновление парка портовых кранов морских портов // Порты Украины. – 2004. – № 6.*
4. Пелашенко С. *Кранбау Эберсвальде: концепция мобильности // Порты Украины. – 2003. – № 5.*
5. Пелашенко С. *Радужные перспективы мобильных кранов // Порты Украины. – 2003. – № 4.*
6. Пустовой В.Н. *Какой кран нужен портам // Порты Украины. – 2003. – № 2.*

7. Пелашенко С. Мобильная техника: перспективы применения // Порты Украины. – 2003. – № 2.
8. Кошелев В.П. Морские порты: стратегия «первооружения» // Порты Украины. – 2003. – № 2.
9. Грязев А.А. Краны: тенденции развития и рынок // Порты Украины. – 2002. – № 1.
10. Кораблев С. Украинские порталльные краны: прошлое, настоящее, будущее... // Зеркало недели. – 2003. – № 48 (473).
11. Официальный сайт компании «Либхерр» – www.liebherr.com
12. Официальный сайт компании «Готтвальд» – www.gottwald.com

Надійшла 25.05.06

МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ

Проведен анализ методов безразборного диагностирования промышленного механического оборудования с целью определения направлений исследований диагностики механизмов портальных кранов по параметрам вибрации для создания практической методики.

Ключевые слова: *виброакустическая диагностика, параметры вибрации, остаточный ресурс механизмов, дефекты и неисправности механизмов.*

Анализ литературных источников [2,3,4,5] в области безразборной диагностики механизмов показал, что наряду со значительным количеством теоретических работ по виброакустической диагностике, методики диагностирования имеющие применение в инженерной практике малочисленны.

Наибольшее распространение получили методики [5,8] диагностирования дорогостоящего роторного оборудования в энергетике (турбины и турбоагрегаты), и для механизмов, обеспечивающих безопасную работу технологических линий в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, металлургии и др. (насосы, компрессоры, вентиляторы, электромшины).

Инженерные методики диагностирования по параметрам вибрации механизмов портальных кранов в практике отсутствуют.

В статье сделан анализ имеющихся достижений в указанной области с целью выбора направления исследований для создания методики диагностирования механизмов портальных кранов.

Метод диагностирования по параметрам вибрации на портальных кранах может быть применен для механизмов подъема, поворота, изменения вылета стрелы и передвижения. В состав механизмов входят электродвигатели, редукторы, тормозные системы, барабаны, открытые зубчатые передачи.

Имеет место узкая область применения виброакустической диагностики на перегрузочной технике. В настоящее время проводится мониторинг технического состояния механизмов козловых грейферных перегружателей Днепро-Бугского морского порта. В основу методики их диагностирования заложен систематический контроль параметров техни-

ческого состояния механизмов. Анализ изменений этих параметров в соответствии с наработкой позволяет прогнозировать остаточный ресурс механизмов и соответственно планировать вывод механизма или перегружателя на ремонт.

Общая методика виброакустического диагностирования построена на определении вероятности отказа [1].

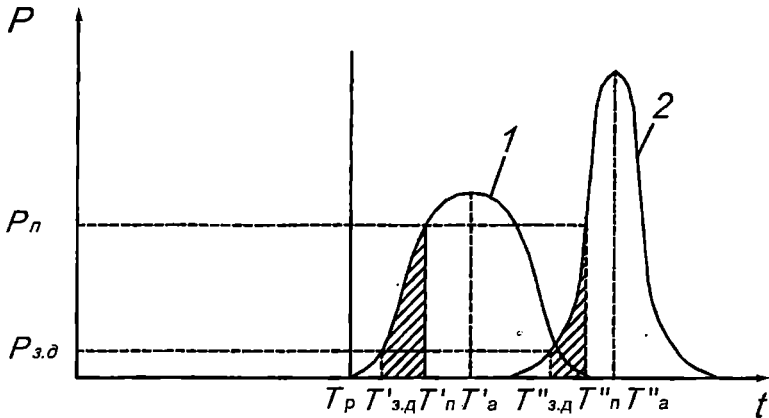


Рис. 1. Вероятность отказа P машин со временем наработки t , определяющая время ремонта машины:

1 – при плано-предупредительном обслуживании (параметры с одним штрихом);

2 – при эксплуатации по состоянию (параметры с двумя штрихами);

T_p – время назначенного ресурса;

$T_{з.д}$ – вероятное время зарождения дефекта;

T_n – вероятное предельное значение времени эксплуатации до ремонта;

T_a – среднее, наиболее вероятное время аварийной ситуации

Зависимость вероятности выхода из строя машины от времени наработки изображена на рис. 1: слева – кривая, построенная для общей совокупности машин, справа – один из возможных вариантов для малой выборки тех же машин.

Жирная вертикальная линия на этой диаграмме задает минимальный безопасный интервал времени эксплуатации T_p до ремонта, определяемый ресурсом механизма. Экономически более выгодна стратегия плано-предупредительных ремонтных работ не через заранее запланированные интервалы времени, а по мере необходимости в соответствии с фактическим техническим состоянием. Для реализации возможности эксплуатации машин по состоянию необходимо иметь оперативную информацию о его изменении по времени наработки.

Для получения этой информации необходима организация постоянного (непрерывного) контроля изменений представительных параметров технического состояния, характеризующих изменение развития эксплуатационных повреждений с наработкой механизма [1], с тем, чтобы указать время, когда скорость потери работоспособности достигнет критической отметки. Одним из таких параметров, характеризующих техническое состояние механизма, является среднеквадратичное значение виброскорости (СКЗ).

На рис. 2 приведена зависимость среднеквадратичного значения виброскорости в полосе частот 10...1000 Гц от времени наработки; здесь четко видно три периода: приработки T_1 , нормальной работы T_2 и деградации T_3 технического состояния механизма, когда скорость ухудшения его быстро нарастает.

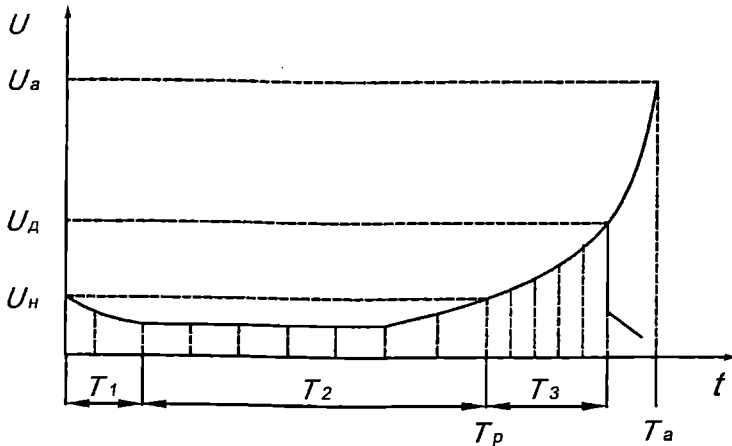


Рис. 2. Характер изменения технического состояния от наработки механизма:

T_1 – период приработки;

T_2 – период нормального функционирования;

T_3 – зарождение и развитие повреждения;

U_n – уровень нормального функционирования (хорошее состояние);

U_d – предельно допустимый уровень (удовлетворительное состояние);

U_a – аварийный уровень (недопустимое, аварийное состояние)

Из этой зависимости следует, что назначенное время T_p проведения планово предупредительных ремонтов намного меньше фактического срока T_f , когда ремонт становится действительно необходимым. Мониторинг изменения параметров вибрации позволяет обнаружить зарождение дефекта и прогнозировать момент наступления аварийных изменений технического состояния, вызванных развитием необратимых деградационных процессов в узлах механизмов, что обеспечивает возможность планирования срока обоснованного ремонта.

Для обнаружения и диагностирования дефектов узлов механизма виброакустическим методом используют информацию, полученную в различных измерительных точках конструкции механизма и вокруг него, в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях измерения, на инфразвуковом, звуковом и ультразвуковом участках частотного диапазона [2,3]. Специальные методы обработки виброакустических сигналов позволяют обнаружить дефекты на ранней стадии их развития, локализовать и идентифицировать вид неисправности, оценить скорость развития [1,3].

Анализ эксплуатации порталных кранов, инженерных методик, норм ИСО по рассматриваемой проблеме показал, что необходимо создание методики диагностирования крановых механизмов по параметрам вибрации на двух уровнях, каждому из которых соответствуют свои задачи и методы решения.

На первом уровне следует определить степень потери работоспособности механизма, т.е. грубо оценить изменения технического состояния механизма в целом.

На втором уровне следует идентифицировать возникшие повреждения в узлах механизма при нарушении его работоспособности.

На первом уровне осуществляется вибромониторинг крановых механизмов, дающий оценку отклонения от нормы характеристик вибросигнала, среднеквадратического значения (СКЗ), уровня вибрации в ограниченном диапазоне частот. Нормы вибрации и методики виброконтроля [2, 3, 4, 5] базируются на сопоставлении СКЗ абсолютных колебаний (по виброскорости) в диапазоне частот 10...1000 Гц с пороговыми значениями для четырех классов машинного оборудования, что упрощает процедуру определения категории текущего технического состояния: хорошего, допустимого, предельно допустимого (предварийного) и недопустимого (аварийного). Нормы относительной вибрации промышленных механизмов, их узлов (редукторов, электродвигателей, барабанов) приведены в стандартах ISO с рекомендациями по использованию параметров виброускорения в диапазоне частот 10...10000 Гц.

На втором уровне производится виброакустическая диагностика неисправностей крановых механизмов, позволяющая распознавать неисправности по совокупности диагностических признаков, т.е. характеристик виброакустических процессов, реагирующих на изменение технического состояния механизмов из-за возникших неисправностей, которые со временем наработки могут привести к потере работоспособности объекта диагностирования.

Проведение виброакустической диагностики механизмов порталных кранов позволит выявлять без демонтажа дефекты деталей и узлов редукторов и электродвигателей.

Состояние зубчатых зацеплений редукторов оценивают по:

- износу зубьев зубчатых колес по толщине;
- питтинговому износу рабочей поверхности зубьев зубчатых колес;
- наличию трещин (поломки) зубьев;
- появлению перекоса в зубчатых зацеплениях.

Состояние подшипниковых узлов редукторов, электродвигателей определяют по наличию следующих дефектов:

- дефектов наружной обоймы подшипника;
- дефектов внутренней обоймы подшипника;
- дефектов тел качения подшипника;
- дефектов сепаратора подшипника;
- ослабления крепления подшипника (проскальзывание наружной обоймы);
- увеличенных зазоров (износ) в подшипнике.

Состояние соединительных муфт определяют по характеру крепления полумуфт на валах и наличию перекоса (расцентровки) соединяемых валов.

При составлении методики диагностирования механизмов порталных кранов необходимо учесть их конструктивные особенности, такие как низкие скорости вращения (до 1000 об/мин) и ограничение рабочих движений по времени (для механизма подъема длительность установившегося движения ограничена длиной канатов и высотой подъема, для механизма изменения вылета – максимальным вылетом)

Систематический контроль вибрационного состояния и диагностирование оборудования без демонтажа позволяют перейти от эксплуатации по заранее назначенному ресурсу к эксплуатации и техническому обслуживанию по предельному состоянию механизма [8]. Эта технология позволяет устранить неожиданные поломки, обеспечить надежную работу механизмов и экономию средств за счет сокращения простоев и ненужного демонтажа оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Балицкий Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков. М.: Наука, 1984. -- 120 с.*
2. *Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / Генкин М.Д., Соколова А.Г. М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.*
3. *Горелик А.Л. Методы технической диагностики машин и механизмов / А.Л. Горелик, Ф.Я. Балицкий, А.Н. Требунский М.: НТЦ «Информатика», 1990. – 204 с.*
4. *ГОСТР ИСО 10816-1 – 99. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования.*
5. *ГОСТ 25364-97. Вибрация. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопровода и общие требования к проведению замеров. М., 1997.*
6. *ГОСТ 20911–75. Техническая диагностика. Основные термины и определения.*
7. *ГОСТ 4.304-85 СПКП. Аппаратура и приборы для измерения вибрации. Номенклатура показателей. М., 1985.*
8. *Методические рекомендации по проведению диагностических виброизмерений центробежных компрессорных машин и центробежных насосных агрегатов предприятий МХНП СССР, (РДИ), МХНП СССР, 1991.*

Надійшла 23.05.06

К РАСЧЕТУ СТАНИН СТАНКОВ ПОРТАЛЬНОГО ТИПА

Разработаны методики расчета тонкостенных стержней замкнутого профиля на базе численно-аналитического варианта метода граничных элементов. Для реализации построенной методики использована среда MATLAB. С целью оценки точности полученных результатов выполнен расчет этого же замкнутого профиля методом конечных элементов в программе ANSYS. Сравнение результатов, полученных обоими методами, показало практически полное их совпадение, что позволяет сделать вывод о достоверности разработанной методики.

Ключевые слова: ansys, matlab, метод конечных элементов, метод граничных элементов, тонкостенный стержень, численные методы.

Основным критерием работоспособности станин является жесткость при кручении, которую можно характеризовать величиной перемещений инструмента относительно изделия в результате деформации станин при заданной нагрузке.

Стремление к получению высокой жесткости станин при одновременной малой металлоемкости приводит к необходимости значительного усложнения конфигурации станин.

Размеры больших станин до сих пор преимущественно выбираются на основе аналогии с хорошо зарекомендовавшими себя в работе конструкциями. Расчет таких станин выполняется в основном в упрощенной постановке, что обусловлено сложностью математического описания модели.

При расчетах на жесткость станины необходимо рассматривать как тонкостенные системы под действием распределенной по некоторому закону пространственной нагрузки.

Расчет тонкостенных систем методами теории оболочек сложен. Теории расчета тонкостенных стержней, созданные В.З. Власовым [1], А.А. Уманским [3] и развитые целым рядом их учеников и последователей, упрощают задачу, но и здесь возникают проблемы при расчете сложных несимметричных систем. Весьма эффективным оказывается использование численных методов.

Целью работы является отработка методик расчета тонкостенных стержней замкнутого профиля методами граничных и конечных элементов с последующим сравнением полученных результатов.

В качестве объекта исследования выбрана балка, имеющая коробчатое поперечное сечение (рис.1).

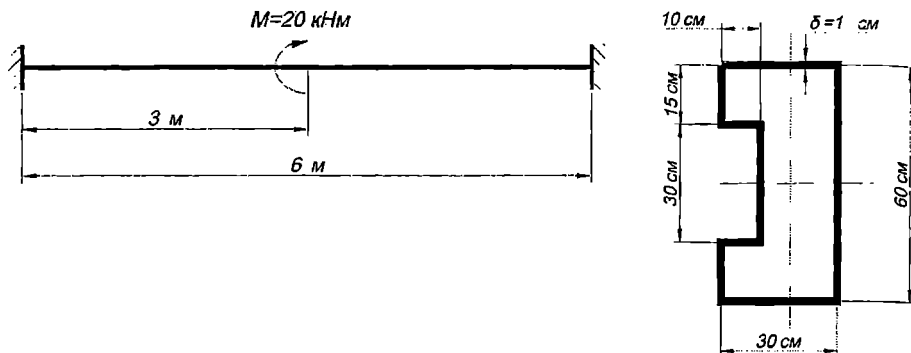


Рис. 1. Расчетная схема объекта исследования

Расчет по методу граничных элементов

Уравнение стесненного кручения тонкостенного стержня имеет вид [1]

$$\theta^4(x) - k^2 \theta(x) = \frac{m(x)\mu}{EI_w}, \quad (1)$$

где k – изгибно-крутильная характеристика поперечного сечения

$$k = \sqrt{\frac{GI_d}{EI_w} \mu}; \quad (2)$$

μ – измеритель депланации сечения или коэффициентом его искажаемости

$$\mu = 1 - \frac{I_d}{I_w} \quad (3)$$

EI_w – секториальная жесткость;

GI_d – жесткость при чистом кручении;

θ – угол закручивания.

Уравнение (1) дополняется начальными условиями:

- кинематические

$GI_d \theta(0)$ – угол закручивания в масштабе жесткости;

$GI_d \theta'(0)$ – производная угла закручивания (имеет механический смысл крутящего момента); (4)

- статические

$$B_w(0) = -GI_d \theta''(0) \quad \text{– бимомент;}$$

$$M_w(0) = -GI_d \theta'''(0) \quad \text{– изгибно-крутящий момент.}$$

Отметим, что при стесненном кручении кинематический параметр $\theta'(x)$ имеет механический смысл статической величины – крутящего момента, а статические параметры $B_w(x)$ и $M_w(x)$ не определяются из уравнений статики.

Уравнение (1) и начальные условия (4) образуют задачу Коши стесненного кручения тонкостенного стержня. По стандартному алгоритму ее решение удобно представить в матричной форме [4]

$$\begin{matrix} GI_d \theta(x) \\ GI_d \theta'(x) \\ B_w(x) \\ M_w(x) \end{matrix} = \begin{matrix} 1 & x & -A_{13} & -A_{14} \\ & 1 & -A_{23} & -A_{13} \\ & & A_{33} & A_{34} \\ & & A_{23} & A_{33} \end{matrix} \begin{matrix} GI_d \theta(0) \\ GI_d \theta'(0) \\ B_w(0) \\ M_w(0) \end{matrix} + \begin{matrix} B_{11}(x) \\ B_{21}(x) \\ -B_{31}(x) \\ -B_{41}(x) \end{matrix}, \quad (5)$$

где фундаментальные ортонормированные функции и слагаемые от внешней нагрузки имеют вид

$$A_{13} = chkx - 1; \quad A_{14} = \frac{shkx - kx}{k}; \quad A_{23} = kshkx; \quad A_{33} = chkx; \quad A_{34} = \frac{shkx}{k};$$

$$B_{11} = M \times A_{14}(x - a_M)_+;$$

$$B_{21} = M \times A_{13}(x - a_M)_+; \quad (6)$$

$$B_{31} = M \times A_{34}(x - a_M)_+;$$

$$B_{41} = M \times A_{33}(x - a_M)_+;$$

M – сосредоточенный крутящий момент;

a_M , – координата внешней нагрузки.

Для определения неизвестных начальных параметров в уравнении (5) составляется и решается система линейных алгебраических уравнений по схеме (при $x = l$)

$$\begin{aligned} Y(l) &= A(l) \times X(0) + B(l) \rightarrow A(l) \times X(0) - Y(l) = \\ &= -B(l) \rightarrow A(l) \times X(l, 0) = -B(l). \end{aligned} \quad (7)$$

Из уравнения (7) определяются неизвестные начальные параметры, а напряженно-деформированное состояние во всех внутренних точках стержня определяется по уравнению (5). Рассмотрим данный алгоритм на примере (рис. 1).

Расчетные соотношения по МГЭ [4]:

| | | | | | | |
|----|----|-----------|-----------|----------------|---|--------------------|
| | | $-A_{13}$ | $-A_{14}$ | $B_w^{0-1}(l)$ | | $-B_{11}^{0-1}(l)$ |
| | | $-A_{23}$ | $-A_{13}$ | $M_w^{0-1}(l)$ | = | $-B_{21}^{0-1}(l)$ |
| -1 | | A_{33} | A_{34} | $B_w^{0-1}(0)$ | | $B_{31}^{0-1}(l)$ |
| | -1 | A_{23} | A_{33} | $M_w^{0-1}(0)$ | | $B_{41}^{0-1}(l)$ |

(8)

Для решения (8) использована среда MATLAB. Определено НДС рассматриваемой конструкции, которое представлено на рис.2 в виде эпюр углов закручивания $GI_d\theta(x)$, крутящих моментов $GI_d\theta'(x)$, бимоментов $B_w(x)$ и изгибно-крутящих моментов $M_w(x)$.

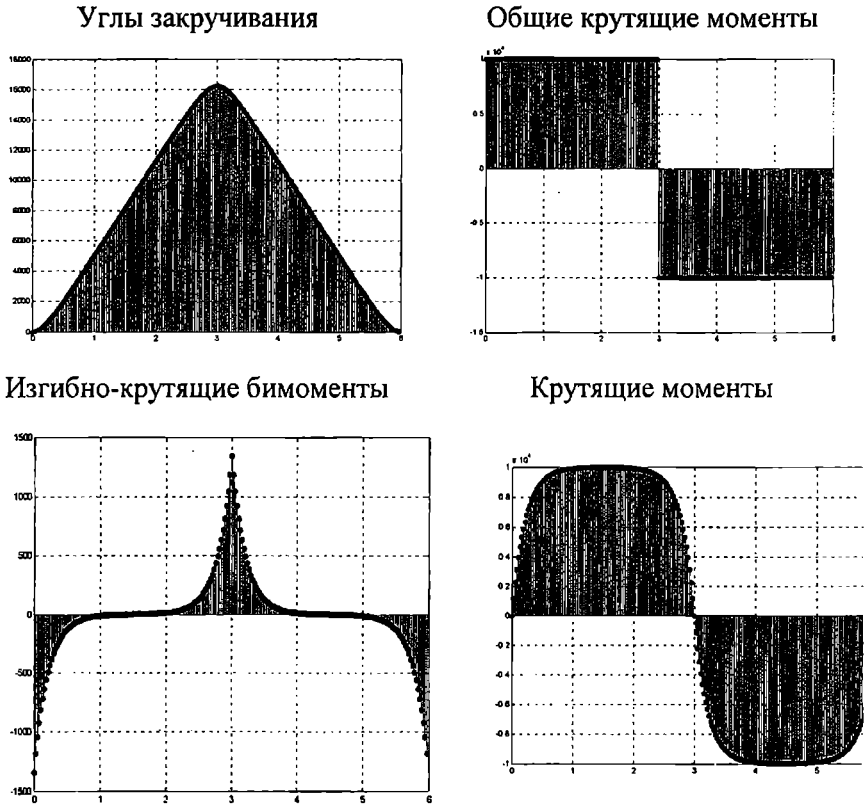


Рис. 2. Эпюры внутренних силовых факторов по МГЭ

Расчет по методу конечных элементов

Для реализации алгоритма МКЭ выбрана программа ANSYS, которая является ведущим конечно-элементным пакетом на мировом рынке.

Аппроксимация трехмерной модели (рис. 1) выполнена элементом BEAM189 из библиотеки конечных элементов программы ANSYS. Это квадратичный трехузловой стержневой элемент, используемый главным образом при расчете тонкостенных профилей (рис. 3).

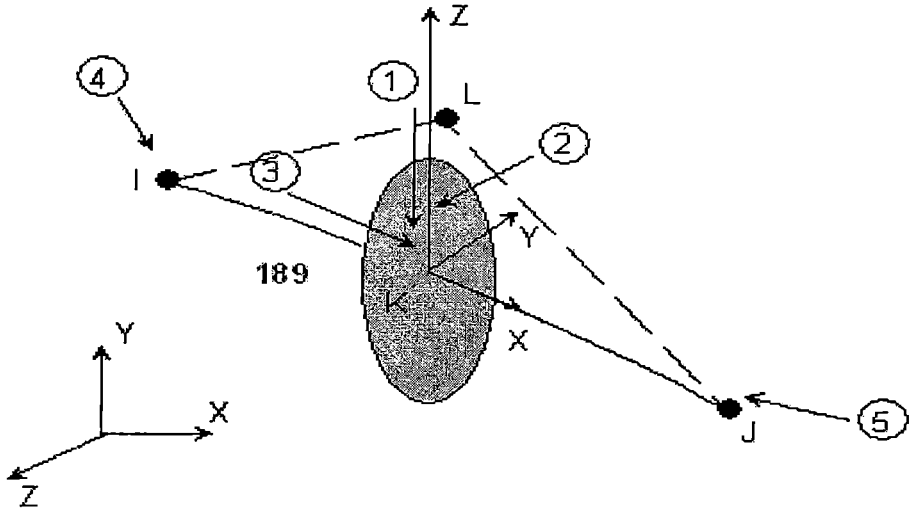
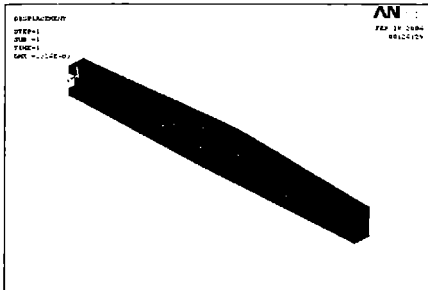
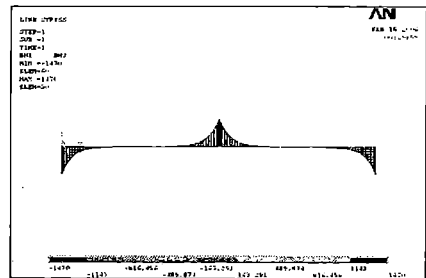


Рис. 3. Расположение узлов в элементе BEAM189

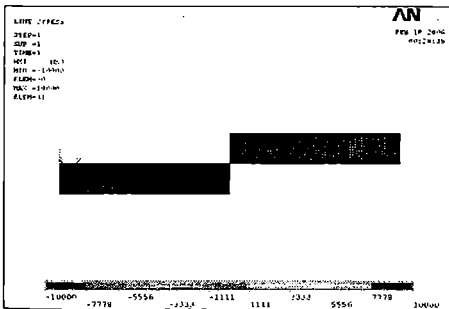
Деформированная схема



Изгибно-крутящие бимоменты



Общие крутящие моменты



Углы закручивания

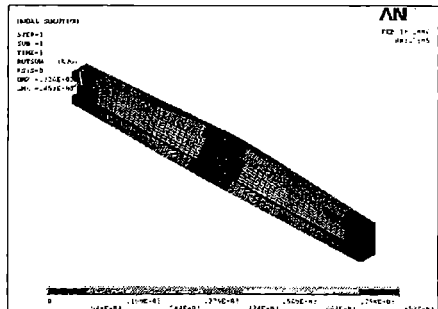


Рис. 4. Эпюры внутренних силовых факторов по МКЭ

Конструкция элемента ВЕАМ189 (как и ВЕАМ188) позволяет выводить в результате расчета изгибно-крутящие бимоменты B_w , что не предусмотрено при использовании других балочных элементов. При этом на тонкостенный профиль не накладывается никаких ограничений.

На рис. 4 показано деформированное состояние стержня, эпюры изгибно-крутящих бимоментов, крутящих моментов и углов закручивания, полученных в результате расчета в программе ANSYS.

Сравнение результатов

В таблице представлены бимоменты, крутящие моменты и углы закручивания, вычисленные для ряда сечений стержня обоими численными методами.

Сравнение результатов свидетельствует об их практическом совпадении. Заметим однако, что при решении методом граничных элементов пришлось решать 4 алгебраических уравнения, в то время как решение этой же задачи методом конечных элементов потребовало решения 160 алгебраических уравнений.

Таблица

Сравнение результатов МГЭ и МКЭ

| x, м | Угол поворота | | | Крутящий момент | | | Бимомент | | |
|------------------|---------------|----------|-------|-----------------|--------|---|----------|-------|------|
| | МКЭ | МГЭ | % | МКЭ | МГЭ | % | МКЭ | МГЭ | % |
| 0,0 | 0 | 0 | 0 | 10000 | 10000 | 0 | -1493,5 | -1470 | 1,57 |
| 1 | 0,0000284 | 0,000028 | 1,41 | 10000 | 10000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0,000569 | 0,000567 | 0,35 | 10000 | 10000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 ⁽¹⁾ | 0,000853 | 0,00085 | 0,352 | 10000 | 10000 | 0 | 1493,5 | 1470 | 1,57 |
| 3 ⁽²⁾ | 0,000853 | 0,00085 | 0,352 | -10000 | -10000 | 0 | 1493,5 | 1470 | 1,57 |
| 4 | 0,000569 | 0,000567 | 0,35 | -10000 | -10000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0,0000284 | 0,000028 | 1,41 | -10000 | -10000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | -10000 | -10000 | 0 | -1493,5 | -1470 | 1,57 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Госиздат. физико-математической литературы, 1959. – 568 с.
2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. Изд. 2-е, испр., М.: Едиториал УРСС, 2004. – 272 с.
3. Уманский А.А. Строительная механика самолета. М.: Государственное научно-техническое издательство ОБОРОНГИЗ, 1961. – 529 с.
4. Численные методы в механике / В. А. Баженов, А. Ф. Даценко, Л. В. Коломиец и др. – Одесса: СТАНДАРТЬ, 2005. – 563 с.

Надійшла 17.05.06

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОСТАВКАМИ НА РЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

На основе методологии проектно-ориентированного управления ремонтными предприятиями разработан алгоритм моделирования работы склада ремонтного предприятия, позволяющий оптимизировать количество и время закупок необходимых материалов.

Ключевые слова: проектный менеджмент, управление поставками проекта, теория управления запасами, теория «старения».

В последние годы широкое распространение в различных областях знаний получила новая научная методология – управление проектами. Теория проектного менеджмента определяет проект как ограниченное во времени целенаправленное изменение отдельной системы с установленными требованиями к качеству результатов, возможными рамками расхода средств и ресурсов и специфической организацией [1]. Исходя из этого определения в работе [2] предлагается рассматривать ремонт всякой технической системы как фазу единого проекта, цель которого состоит в максимизации эффекта, полученного в процессе функционирования системы.

Проектно-ориентированный подход в управлении ремонтом технических систем приведет к коренному изменению системы управления ремонтными предприятиями [3]. Переход к постиндустриальному обществу вынуждает проектантов, производителей и ремонтников технических систем рассматривать каждое изделие с позиций интересов потребителя. Миссия такого предприятия должна сочетать интересы собственников и сотрудников организации с одной стороны, и потребителей продукции – с другой. Если предприятие производит какую-либо продукцию или оказывает услуги потребителю, то его миссию можно сформулировать как максимизацию прибыли, полученную в рамках уставной деятельности. Однако для организаций, занимающихся ремонтной деятельностью, такой критерий не может быть использован в качестве стратегической функции развития, поскольку дополнительная прибыль, полученная ремонтным заводом, оборачивается дополнительными убытками собственника.

Проектный менеджмент предполагает достижение стратегических целей предприятия при помощи управления портфелем – набором программ, проектов и других работ, которые могут быть не связаны между собой. Одной из основных областей знаний управления проектами

является управление поставками проекта, включающее в себя процессы покупки тех необходимых продуктов, услуг или результатов, которые производятся вне исполняющей организации [1]. Процессы управления поставками включают в себя следующие элементы:

- планирование покупок;
- планирование контрактов;
- запрос информации у продавцов;
- выбор продавцов;
- администрирование контрактов;
- закрытие контрактов.

Основным элементом процессов управления контрактами принято считать планирование покупок и приобретений, в процессе которого устанавливается потребные номенклатура, количество и сроки проведения закупок. Особенностью ремонтного производства является потребность в большом количестве разнородных ремонтных материалов. Увеличение материальных запасов приводит к отвлечению капитальных вложений из сферы обращения («замораживанию» капитала), росту расходов на долгосрочное хранение сырья и материалов, организацию складского хозяйства. В то же время снижаются потери организации, вызванные дефицитом той или иной номенклатуры материалов. Поэтому определение оптимального уровня запасов на ремонтных предприятиях является достаточно сложной и важной задачей.

В теории запасов приводятся аналитические решения указанной проблемы для ряда простейших случаев, в которых в качестве целевой функции выступает минимизация суммарных приведенных затрат на приобретение и хранение материала с учетом недополученной прибыли от «замораживания» капитала, и от потери клиента, которая вызвана дефицитом той или иной номенклатуры запасов [3].

Поэтому задача оптимальной организации материально-технического снабжения для ремонтных предприятий значительно сложнее, нежели для организаций других типов, и для ее решения нами предлагается использовать следующую методику.

Пусть на склад предприятия через определенные промежутки времени t_j , $j = 1, 2, \dots, n$ поступает p_j материалов данного вида. Через другие промежутки времени t_χ , $\chi = 1, 2, \dots, m$ складу предъявляются заявки на расходование r_χ этих материалов (см. рис. 1). Законы распределения величин t_j , p_j , t_χ и r_χ могут быть определены на основании теории «старения», изложенной в [4].

Таким образом, имеются два неординарных потока – поток поставок и поток заявок. В процессе моделирования целесообразно рассматривать один суммарный поток событий на складе, каждое из которых характеризуется тремя параметрами: моментом возникновения, мощностью (количество или вес материала данной номенклатуры) и знаком (поставка или заявка).

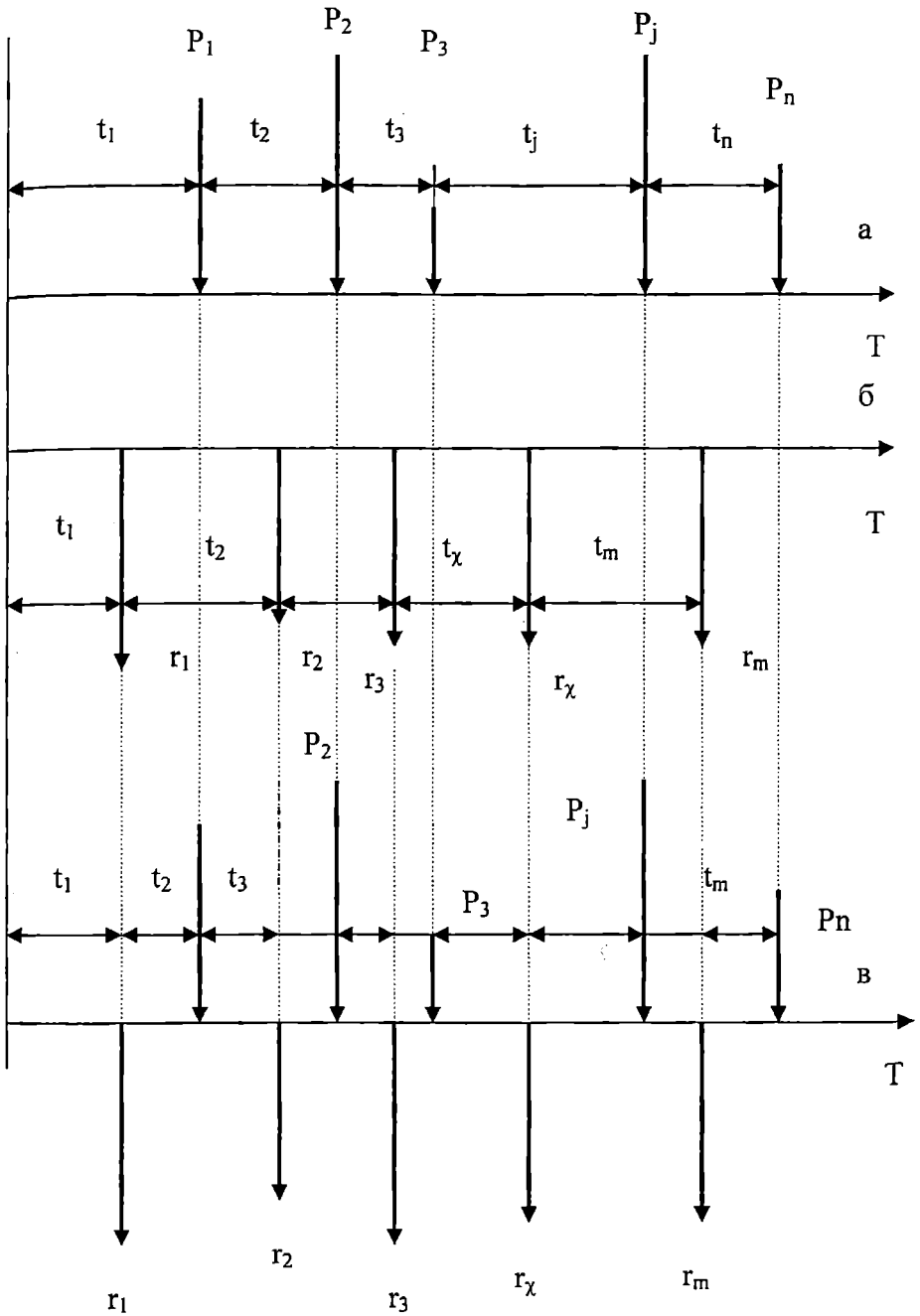


Рис. 1. Потоки событий на складе:
 а – поток поставок;
 б – поток заявок;
 в – суммарный поток событий

В процессе моделирования параметры каждого i -го события на складе формируются с использованием следующих данных, полученных при формировании предыдущего, $(i - 1)$ -го события:

T_{i-1} – момент возникновения $(i - 1)$ -го события на складе;

T_{j-1} – момент поступления на склад последней поставки;

$T_{\chi-1}$ – момент предъявления складу последней заявки.

Если предыдущее событие являлось поставкой ($T_{i-1} = T_{j-1}$), то по заданному закону распределения формируется промежуток времени между $(j-1)$ -й и j -й поставками t_j . Затем определяется момент времени поступления j -й поставки

$$T_j = T_{j-1} + t_j.$$

Далее производится сравнение T_j и $T_{\chi-1}$. Если $T_j < T_{\chi-1}$, то i -е событие является поставкой и $T_i = T_j$.

Производится формирование P_i по заданному закону распределения, принимается, что $r_i = 0$ и $T_{\chi} = T_{\chi-1}$, так как новая заявка на данном шаге моделирования не формировалась. Если $T_j > T_{\chi-1}$, то i -е событие является требованием и $T_i = T_{\chi-1}$. Тогда формируется очередное значение r_i , принимается, что $P_i = 0$ и $T_{\chi} = T_{\chi-1}$.

Если предыдущее событие являлось не поставкой, а заявкой ($T_{i-1} = T_{\chi-1}$) то формируется промежуток времени между $(\chi - 1)$ -й и χ -й заявками t_{χ} . Определяется момент времени χ -й заявки

$$T_{\chi} = T_{\chi-1} + t_{\chi}.$$

Затем сравнивается T_{χ} и T_{j-1} . Если $T_{\chi} < T_{j-1}$, то i -е событие является заявкой и $T_i = T_{\chi}$. Формируется r_i , принимается, что $P_i = 0$, а $T_j = T_{j-1}$. Если $T_{\chi} > T_{j-1}$, то i -е событие является поставкой и $T_i = T_{j-1}$. Производится формирование P_i и принимается, что $r_i = 0$. Затем определяется промежуток времени между двумя смежными событиями на складе:

$$t_i = T_i - T_{i-1}.$$

Последовательно принимая значения $i = 1, 2, 3, \dots$, получим возможность формирования суммарного потока событий на складе в зависимости от параметров потоков поставок и заявок.

При дальнейшем решении задачи учитываются только параметры суммарного потока событий на складе, а также следующие результаты предыдущего шага моделирования:

q_{i-1} – наличие изделий на складе в момент $T_{i-1} + \Delta$ (Δ – сколько угодно малая величина);

d_{i-1} – дефицит изделий на складе в момент T_{i-1} ;

D_{i-1} – суммарный дефицит изделий на складе с начала отсчета до момента T_{i-1} ;

P_{i-1} – суммарное время хранения изделий на складе с начала отсчета до момента T_{i-1} .

Моделирование осуществляется в следующей последовательности:

- определяется наличие изделий на складе в момент $T_i + \Delta$:

$$q_i = q_{i-1} - d_{i-1} + P_i - r_i;$$

- рассчитывается дефицит изделий на складе в момент $T_i + \Delta$:

$$q_i = -q_{i-1} + d_{i-1} - P_i + r_i;$$

следует обратить внимание, что если в момент возникновения заявка за счет наличия изделий на складе удовлетворяется не полностью, то образовавшийся дефицит сохраняется и покрывается лишь за счет следующих поставок. Следовательно, данная задача относится к классу задач массового обслуживания с неограниченным ожиданием;

- определяется суммарное время хранения изделий на складе с начала отсчета до момента T_i :

$$P_i = P_{i-1} + q_{i-1}t_i;$$

- определяется суммарный дефицит изделий с начала отсчета до момента T_i :

$$D_i = D_{i-1} + d_{i-1}t_i.$$

По окончании этой операции T_i сравнивается с заранее заданным периодом T , в течение которого решено моделировать работу склада. Если $T_i < T$, то моделируется $(i + 1)$ -е событие на складе, которое выполняется аналогично. При первом шаге ($i = 1$) все исходные данные равны нулю, кроме начального (переходящего) запаса изделий на складе q_0 , который задается.

При $T_i \geq T$, процесс моделирования заканчивается, а полученные значения суммарного времени хранения изделий на складе P и суммарный дефицит изделий на складе D позволяют определить критерий оптимальности при заданном уровне переходящего запаса

$$E = C_1P + C_2D \xrightarrow{q_0} \min ,$$

где C_1 – издержки, вызываемые на складе хранением единицы массы материала данной номенклатуры в течение единицы времени, включая отвлечение капитальных вложений из сферы обращения;

C_2 – издержки основного производства в результате задержки на единицу времени поставки единицы массы материала данной номенклатуры.

Блок-схема моделирующего алгоритма приведена на рис. 2.

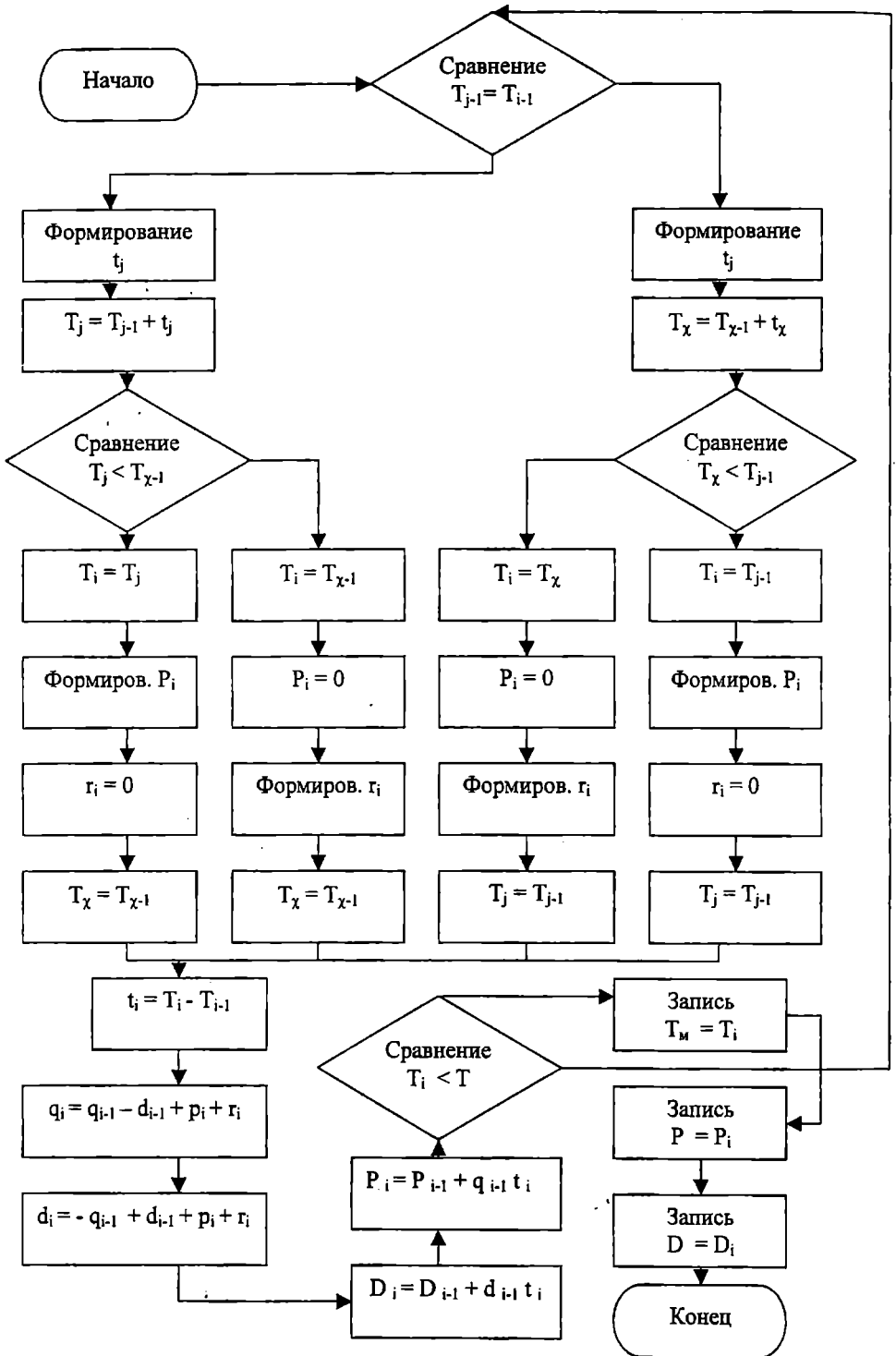


Рис. 2. Блок-схема алгоритма моделирования работы склада

Задавая различные значения q_0 , можно получить соответствующие значения критерия оптимальности. Так, при увеличении q_0 будет возрастать первое слагаемое в целевой функции и уменьшаться второе. Оптимизация запаса сводится к отысканию минимального значения критерия оптимальности E методом простого перебора.

В случае, если определение коэффициентов C_1 и C_2 вызывает затруднения из-за недостатка статистической информации, можно определить необходимый запас материалов по заданному максимально-допустимому значению дефицита. При помощи предложенного алгоритма следует выполнять оптимизацию для каждого вида материала отдельно.

Выполненный в соответствии с представленным алгоритмом расчет, должен стать основой для остальных элементов процесса управления закупками и в первую очередь выбора продавцов и типа контрактов. Все существующие контракты условно делятся на три основных типа:

- контракты с фиксированной ценой;
- контракты с возмещением затрат;
- контракты типа «время и материалы».

Первый тип предполагает общую фиксированную стоимость четко описанного продукта, хотя он может и предусматривать поощрение за достижение или улучшение отдельных параметров (качество, сроки). Согласно второму типу покупатель возмещает поставщику фактически понесенные затраты и обычно, выплачивает вознаграждение, которое составляет прибыль продавца. Контракты типа «время и материалы» представляют собой гибридный тип контрактов, содержащий отдельные положения контрактов первого и второго типов. На момент заключения контракта не определено точное количество предметов поставки, а оговариваются лишь ставки оплаты для отдельных категорий ресурсов. Именно такой тип контрактов, по нашему мнению, является предпочтительным для оптимальной организации материально-технического снабжения ремонтных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Керівництво з питань Проектного Менеджменту. – Пер. з англ. / Під ред. С.Д. Бушусва, 2-е вид., перероб. – К.: Делова Україна, 2000. – 198 с.
2. Шахов А.В. Проектирование жизненного цикла ремонтно-пригодных технических систем. – Одеса: Феникс, 2005. – 165 с.
3. Кремер Н.Ш. Исследование операций в экономике. М.: ЮНИТИ, 1997. – 408 с.
4. Шахов А.В. Моделирование процесса «старения» ремонтно-пригодных технических систем // Вісник ОНМУ. – Одеса: Вид-во ОНМУ, 2002. – № 9. – С.81-90.

Надійшла 22.05.06

УДК 629.5.01

**С.К. Чернов
С.Д. Титов**

ФОРМАЛІЗАЦІЯ СКЛАДАННЯ СПРЯЖЕНИХ ЗАДАЧ ЛІНІЙНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

У представлений роботі надано точне математичне визначення поняття двоїстості в теорії лінійних систем. Узагальнено визначення впливу прямої та двоїстої задачі на різні форми запису задач лінійного програмування. Формалізований перехід до спряжених задач представлено у вигляді зручних таблиць, та його інтерпретовано модельними прикладами.

Ключові слова: лінійна система, лінійне програмування, пряма задача, двоїста задача, двоїстість, цільова функція, система обмежень, пари спряжених задач.

Постановка проблеми

В багатьох розділах математики (теорія множин, предикатів, висловлювань, алгебра подій, геометрія тощо) існують так звані теореми двоїстості. За певними правилами прямої теоремі ставиться у відповідність двоїста. У класичному розділі лінійного програмування (ЛП) звісна така пара екстремальних задач. Пов'язано це з особливістю опуклих множин – замкнені опуклі множини у векторному просторі можливо описувати двояко, як у вихідному R^n так і у спряженому R^m просторі. Існуючі схеми переходу від прямої задачі I лінійного програмування до двоїстої II мають як правило змістовно економічний характер [1, 2, 6, 7] і тому не можуть задовольняти строгим математичним дослідженням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасний математичний апарат теорії лінійних активних систем використовує поняття двоїстості [1, 2] для розв'язування та аналізу задач оптимізації ієрархічних структур, в задачах синтезу механізмів стимулювання багаторівневих організаційних систем, в задачах розподілу ресурсів, в задачах управління організаційними системами і т.д. [3, 4, 5].

Постановка завдання

У дослідженні ставилось завдання строгого математичного обґрунтування запропонованого загального алгоритму переходу до двоїстої задачі в теорії лінійних активних систем, і відповідно, формалізація та спрощення переходу до двоїстої задачі при розв'язуванні пар спряжених задач.

Виклад основного матеріалу

Означення двоїстості для стандартної форми задачі ЛП

Означення. Нехай маємо пряму задачу лінійного програмування у стандартній формі

$$\begin{aligned} W_I &= C X - \max, \\ I: A X &\leq B, \\ X &\geq 0, \end{aligned}$$

двоїстою до неї задачею прийнято називати задачу вигляду

$$\begin{aligned} W_{II} &= Y B - \min, \\ II: Y A &\geq C^T, \\ Y &\geq 0. \end{aligned}$$

Надалі будуть застосовуватися такі позначення

$$c = C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \in R^n,$$

$$y = Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\} \in R^m,$$

$$a^j = \{a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn}\} \in R^n, j \in \{1, 2, \dots, m\}.$$

$$x = X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix}, b = B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_m \end{pmatrix}, c = C^T = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ c_n \end{pmatrix},$$

$$a_i = \begin{pmatrix} a_{1i} \\ a_{2i} \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{mi} \end{pmatrix}, i \in \{1, 2, \dots, n\},$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1\ n-1} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2\ n-1} & a_{2n} \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{m\ n-1} & a_{m\ n} \end{pmatrix} = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n\} = \begin{pmatrix} 1 \\ \mathbf{a} \\ 2 \\ \mathbf{a} \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{a} \\ m \end{pmatrix} =$$

$$= \{a_{ij}\} \in R^m \otimes R^n, (m \times n).$$

З означення двоїстої задачі випливає декілька очевидних фактів:

- екстремальні властивості цільових функцій протилежні за смыслом – пряма задача ЛП на максимум, а двоїста на мінімум;
- система обмежень прямої задачі складається тільки з нерівностей, з'єднаних відношенням \leq – для задачі на максимум обов'язковою є вимога наявності тільки обмежень-нерівностей вигляду \leq ;
- коефіцієнти цільової функції двоїстої задачі є компонентами вектора правих частин системи обмежень прямої задачі ЛП;
- матриця системи обмежень двоїстої задачі є транспонованою по відношенню до прямої. Це дійсно так, оскільки $YA = A^T Y^T$;
- праві частини системи обмежень двоїстої задачі є коефіцієнтами цільової функції прямої задачі;
- кожному обмеженню-нерівності прямої задачі ставиться у відповідність невід'ємна двоїста невідома;

$$(a^j \mathbf{x}) \leq b_j \xrightarrow{\text{def}} y_j \geq 0$$

- кожній невід'ємній невідомій прямої задачі ЛП ставиться у відповідність обмеження-нерівність двоїстої;

$$x_i \geq 0 \xrightarrow{\text{def}} (y a_i) \geq c_i.$$

Підтвердимо спряженість або двоїстість наведеного означення – застосування операції отримання двоїстої задачі від двоїстої призводить до прямої задачі

$$I \xrightarrow{\text{def}} II \xrightarrow{\text{def}} I.$$

Представимо двоїсту задачу у вигляді задачі на максимум та, застосовуючи правила переходу й еквівалентні перетворення, доводимо двоїстість

$$\begin{aligned}
 W_{II} = -Y B - \max, & & W_{II} = -(C^T)^T X - \min, \\
 -Y A \leq -C^T, & \xrightarrow{\text{def}} & -AX \leq -B, & \Leftrightarrow \\
 Y \geq 0. & & X \geq 0. \\
 & & \Downarrow \\
 & & W_I = C X - \max, \\
 & & \Leftrightarrow A X \leq B, \\
 & & X \geq 0.
 \end{aligned}$$

Таким чином головною ознакою двоїстості задач в ЛП є можливість зведення їх одна до одної за означенням.

Розглянемо пару задач ЛП та доведемо їх спряженість.

$$I: \quad \begin{aligned} W_I = C X - \max, \\ A X = B, \end{aligned} \xrightarrow{\text{def}} II: \quad \begin{aligned} W_I = YB - \min, \\ YA = C^T. \end{aligned}$$

Доведення.

$$\begin{aligned}
 I: \quad & \begin{aligned} W_I = C X - \max, \\ A X = B, \end{aligned} \xrightarrow{X=X''-X' \quad X'' \geq 0, X' \geq 0} \\
 & \begin{aligned} W_I = C (X'' - X') - \max, \\ \begin{cases} A (X'' - X') \leq B, \\ -A (X'' - X') \leq -B, \end{cases} \end{aligned} \xrightarrow{\text{def}} II: \\
 & \begin{aligned} X'' \geq 0, X' \geq 0, \\ W_{II} = (Y'' - Y')B - \min, \\ \begin{cases} (Y'' - Y')A \geq C^T, \\ (Y'' - Y')(-A) \geq -C^T, \end{cases} \end{aligned} \Leftrightarrow II: \quad \begin{aligned} W_I = YB - \min, \\ YA = C^T. \\ Y'' \geq 0, Y' \geq 0, \end{aligned}
 \end{aligned}$$

Доведена двоїстість задач дозволяє сформулювати наслідки з означення двоїстості:

- кожному обмеженню-рівнянню прямої задачі ставиться у відповідність довільна за знаком двоїста невідома;
 $I: A X = B, \xrightarrow{\text{def}} II: Y;$
- довільній за знаком невідомій прямої задачі ставиться у відповідність обмеження-рівняння двоїстої. $I: X \xrightarrow{\text{def}} II: YA = B.$

Застосовуючи аналогічні ідеї неважко довести спряженість основних форм пар двоїстих задач

$$I: \begin{array}{l} W_I = C X - \max, \\ A X \leq B, \end{array} \xrightarrow{\text{def}} II: \begin{array}{l} W_{II} = YB - \min, \\ YA = C^T, \\ Y \geq 0. \end{array}$$

$$I: \begin{array}{l} W_I = C X - \max, \\ A X = B, \\ X \geq 0, \end{array} \xrightarrow{\text{def}} II: \begin{array}{l} W_{II} = YB - \min, \\ YA \geq C^T, \end{array}$$

$$I: \begin{array}{l} W_I = C X - \min, \\ A X \geq B, \end{array} \xrightarrow{\text{def}} II: \begin{array}{l} W_{II} = YB - \max, \\ YA = C^T, \\ Y \geq 0. \end{array}$$

Означення двоїстості для загальної форми задачі ЛП

Наведені пари двоїстих задач дозволяють виконати узагальнення означення двоїстості в задачах лінійного програмування на випадок прямої задачі в загальній формі.

Означення. Нехай маємо загальну задачу лінійного програмування

$$W_I = C X - \max,$$

$$I: \left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \leq \\ = \end{bmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}, \\ x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, l, \end{array} \right.$$

або із застосуванням символів сумування

$$W_I = \sum_{j=1}^n c_j x_j - \max,$$

$$I: \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, & i = 1, 2, 3, \dots, k, \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i, & i = k+1, k+2, k+3, \dots, m, \\ x_j \geq 0, & j = 1, 2, \dots, l, \end{cases}$$

двоїстою до неї будемо називати задачу вигляду

$$W_{II} = Y B - \min,$$

$$II: \begin{cases} \left(Y_1 \quad Y_2 \right) \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \geq \\ = \end{bmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix}, \\ y_i \geq 0, & i = 1, 2, \dots, k, \end{cases}$$

або із застосуванням символів сумування

$$W_{II} = \sum_{i=1}^m b_i y_i - \min,$$

$$II: \begin{cases} \sum_{i=1}^m y_i a_{ij} \geq c_j, & j = 1, 2, 3, \dots, l, \\ \sum_{i=1}^m y_i a_{ij} = c_j, & j = l+1, l+2, l+3, \dots, n, \\ y_i \geq 0, & i = 1, 2, \dots, m. \end{cases}$$

Модельний приклад.

До прямої задачі лінійного програмування

$$W_I = x_1 + 9x_2 + 5x_3 - 7x_4 - \max,$$

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 - x_4 \geq 4, \\ 2x_1 - x_2 + 3x_3 - 2x_4 \leq 3, \\ 3x_1 + x_2 - 2x_3 + x_4 = 2, \\ x_1 \geq 0, x_4 \geq 0, \end{cases}$$

скласти двоїсту задачу.

Для початку переходу до двоїстої задачі підготуємо систему обмежень – для задачі на максимум необхідна наявність нерівностей тільки \leq . Змінюємо знак першої нерівності на протилежний.

$$W_I = x_1 + 9x_2 + 5x_3 - 7x_4 - \max,$$

$$\begin{cases} -x_1 - x_2 - x_3 + x_4 \leq -4, \\ 2x_1 - x_2 + 3x_3 - 2x_4 \leq 3, \\ 3x_1 + x_2 - 2x_3 + x_4 = 2, \\ x_1 \geq 0, x_4 \geq 0. \end{cases}$$

Перехід до двоїстої задачі зручно виконувати в таблиці

| $Y \setminus X$ | $X_1 \geq 0$ | X_2 | X_3 | $X_4 \geq 0$ | $?_I$ | B |
|-----------------|--------------|-------|-------|--------------|--------|-----|
| $Y_1 \geq 0$ | -1 | -1 | -1 | 1 | \leq | -4 |
| $Y_2 \geq 0$ | 2 | -1 | 3 | -2 | \leq | 3 |
| Y_3 | 3 | 1 | -2 | 1 | $=$ | 2 |
| $?_{II}$ | \geq | $=$ | $=$ | \geq | | |
| C | 1 | 9 | 5 | -7 | | |

Двоїста задача має вигляд

$$W_{II} = -4y_1 + 3y_2 + 2y_3 - \min,$$

$$\begin{cases} -y_1 + 2y_2 + y_3 \geq 1, \\ -y_1 - y_2 + y_3 = 9, \\ -y_1 + 3y_2 - 2y_3 = 5, \\ y_1 - 2y_2 + y_3 \geq -7, \\ y_1 \geq 0, y_4 \geq 0. \end{cases}$$

Недослідженою залишилася ситуація присутності недодатних невідомих у прямій задачі та порушення відповідності знака нерівності типу екстремуму.

Доведемо, що кожній недодатній невідомій прямої задачі ставиться у відповідність обмеження-нерівність для $\max - \geq$, та для $\min - \leq$.

Пара задач ЛП є двоїста

$$\begin{array}{ll}
 W_I = C X - \max, & W_{II} = YB - \min, \\
 I: \quad A X \geq B, & \xrightarrow{\text{def}} II: \quad YA \leq C^T, \\
 \quad X \geq 0, & \quad Y \leq 0.
 \end{array}$$

Дійсно

$$\begin{array}{ll}
 W_I = C X - \max, & W_I = C X - \max, \\
 I: \quad A X \geq B, & \Leftrightarrow I: \quad -A X \leq -B, \quad \xrightarrow{\text{def}} \\
 \quad X \geq 0, & \quad X \geq 0, \\
 & W_{II} = Y'(-B) - \min, \\
 \xrightarrow{\text{def}} II: & Y'(-A) \geq C^T, \quad Y' = -Y \\
 & \quad Y' \geq 0. \\
 & W_{II} = YB - \min, \\
 II: & YA \leq C^T, \\
 & \quad Y \leq 0.
 \end{array}$$

Таким чином доведено, що в разі порушення відповідності знака нерівності типу оптимуму, двоїста невідома має бути недодатною.

Аналогічно встановлюється, що кожній недодатній невідомій прямої задачі ставиться у відповідність обмеження-нерівність у двоїстій задачі, протилежне за знаком основному означенню. На цих підставах наведені пари задач є двоїстими.

$$\begin{array}{ll}
 W_I = C X - \max, & W_{II} = YB - \min, \\
 I: \quad A X \leq B, & \xrightarrow{\text{def}} II: \quad YA \leq C^T, \\
 \quad X \leq 0 & \quad Y \geq 0.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 W_I = C X - \max, & W_{II} = YB - \min, \\
 I: \quad A X \geq B, & \xrightarrow{\text{def}} II: \quad YA \leq C^T, \\
 \quad X \leq 0, & \quad Y \leq 0
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 W_I = C X - \min, \\
 I: \quad A X \geq B, \\
 \quad \quad X \leq 0,
 \end{array}
 \xrightarrow{\text{def}}
 \begin{array}{l}
 W_{II} = YB - \max, \\
 II: \quad YA \geq C^T, \\
 \quad \quad Y \geq 0.
 \end{array}$$

Означення двоїстості для довільної форми задачі ЛП

Узагальнюючи наведені вище доведення та наслідки можливо отримати загальний алгоритм переходу до двоїстої задачі для довільної форми задачі лінійного програмування.

Означення. Для довільної форми задачі лінійного програмування

$$\begin{array}{l}
 W_I = C X - \max, \\
 I: \quad \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{cc} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \\ A_{31} & A_{32} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{array} \right) \left[\begin{array}{c} \leq \\ \geq \\ = \end{array} \right] \left(\begin{array}{c} B_1 \\ B_2 \\ B_2 \end{array} \right) \\ x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, k, \\ x_j \leq 0, \quad j = k + 1, k + 2, \dots, l, \\ x_j, \quad j = l + 1, l + 2, \dots, n, \end{array} \right.
 \end{array}$$

або із застосуванням символів сумування

$$\begin{array}{l}
 W_I = \sum_{j=1}^n c_j x_j - \max, \\
 I: \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, s, \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i, \quad i = s + 1, s + 2, s + 3, \dots, t, \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i, \quad i = t + 1, t + 2, t + 3, \dots, m, \\ x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, k, \\ x_j \leq 0, \quad j = k + 1, k + 2, \dots, l, \\ x_j, \quad j = l + 1, l + 2, \dots, n, \end{array} \right.
 \end{array}$$

двоїстою до неї будемо називати задачу вигляду

$$W_{II} = Y B - \min,$$

$$II : \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{ccc} Y_1 & Y_2 & Y_3 \end{array} \right) \left(\begin{array}{cc} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \\ A_{31} & A_{32} \end{array} \right) \left[\begin{array}{l} \geq \\ \leq \\ = \end{array} \right] \left(\begin{array}{c} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{array} \right), \\ y_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, s, \\ y_i \geq 0, \quad i = s + 1, s + 2, \dots, t, \\ y_i, \quad i = t + 1, t + 2, \dots, m, \end{array} \right.$$

або із застосуванням символів сумування

$$W_{II} = \sum_{i=1}^m b_i y_i - \min,$$

$$II : \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m y_i a_{ij} \geq c_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, k, \\ \sum_{i=1}^m y_i a_{ij} \leq c_j, \quad j = k + 1, k + 2, k + 3, \dots, l, \\ \sum_{i=1}^m y_i a_{ij} = c_i, \quad i = l + 1, l + 2, l + 3, \dots, n, \\ y_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, s, \\ y_i \leq 0, \quad i = s + 1, s + 2, \dots, t, \\ y_i, \quad i = t + 1, t + 2, \dots, m. \end{array} \right.$$

Модельний приклад.

Скласти двоїсту задачу до наведеної прямої задачі

$$W_I = 2x_1 + 3x_2 - 4x_3 - x_4 - \max,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -x_1 + 3x_2 - 6x_3 - x_4 \geq 9, \\ 9x_1 - 5x_2 + 9x_3 - x_4 \leq 3, \\ x_1 + 9x_2 - 8x_3 + 3x_4 = 1, \\ x_1 \geq 0, x_2 \leq 0, x_4 \geq 0, \end{array} \right.$$

Перехід до двоїстої задачі виконуємо в таблиці

| $Y \setminus X$ | $X_1 \geq 0$ | $X_2 \leq 0$ | X_3 | $X_4 \geq 0$ | $?,$ | B |
|-----------------|--------------|--------------|-------|--------------|--------|-----|
| $Y_1 \leq 0$ | -1 | 3 | -6 | -1 | \geq | 9 |
| $Y_2 \geq 0$ | 9 | -5 | 9 | -1 | \leq | 3 |
| Y_3 | 1 | 9 | -8 | 3 | $=$ | 1 |
| $?_{II}$ | \geq | \leq | $=$ | \geq | | |
| C | 2 | 3 | -4 | -1 | | |

Двоїста задача має вигляд

$$W_{II} = 9y_1 + 3y_2 + y_3 - \min,$$

$$II: \begin{cases} -y_1 + 9y_2 + y_3 \geq 2, \\ 3y_1 - 5y_2 + 9y_3 \leq 3, \\ -6y_1 + 9y_2 - 8y_3 = -4, \\ -y_1 - y_2 + 3y_3 \geq -1, \\ y_1 \leq 0, \quad y_2 \geq 0. \end{cases}$$

Висновки. Запропоновано та строго теоретично доведено загальний алгоритм складання двоїстих задач в теорії лінійних систем, який дозволить формалізувати перехід до двоїстих задач при довільній формі представлення прямих задач.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ашманов С.А. Линейное программирование. – М.: Наука, 1981.
2. Ашманов С.А. Введение в математическую экономику. – М.: Наука, 1984.
3. Новиков Д.А. Стимулирование в социально-экономических системах (базовые математические модели). – М.: ИПУ РАН, 1998. – 216 с.
4. Новиков Д.А. Стимулирование в организационных системах. – М.: Синтег, 2003. – 312 с.
5. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. – М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
6. Бугір М.К. Математика для економістів Лінійна алгебра, лінійні моделі. – К.: Видавничий центр «Академія», 1998.
7. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1975.

Надійшла 25.05.06

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ

Предложена эколого-экономическая модель экологической системы. Установлен критерий эффективного управления этой системой. Аналитическим путем получены формулы для определения минимальных суммарных затрат в системе, в зависимости от существующего в ней уровня экологического риска.

Ключевые слова: система, затраты, экологический риск, управление.

Характеристика экологической системы и методологические основы ее моделирования

Экологическая система является сверхсложной вероятностной системой, состоящей из множества взаимосвязанных элементов, функционирующих для достижения определенной цели. Этой целью является создание безопасных условий жизни всех членов общества.

В процессе функционирования экологической системы для достижения указанной цели решаются следующие основные задачи:

- предотвращение химического загрязнения воздуха, почвы и водоемов;
- предотвращение действия акустического загрязнения окружающей среды;
- предотвращение действия ионизирующего загрязнения окружающей среды;
- предотвращение электромагнитного загрязнения окружающей среды.

Элементами экологической системы являются:

- окружающая среда;
- производственная сфера;
- общество.

С точки зрения функциональной принадлежности указанные выше элементы экологической системы могут выступать как:

- заказчик;
- инвестор;
- потребитель;
- подрядчик;
- проектировщик.

Экологическая система характеризуется:

- большим количеством элементов и связей;
- разнообразием функциональных ролей каждого элемента;
- переменностью характеристик во времени;
- стохастическим характером протекающих в системе явлений;
- трудностью учета человеческого фактора.

Все вышеперечисленные особенности затрудняют экспериментальное изучение экологической системы, что способствует развитию математических методов моделирования для ее исследования.

Прикладными целями моделирования экологической системы являются:

- прогнозирование экологического состояния окружающей среды;
- оптимизация процесса управления затратами, направленными на улучшение качества окружающей среды.

К основным задачам, решаемым в процессе моделирования экологической системы, следует отнести:

- анализ системы и ее элементов;
- определение связей между элементами;
- выявление входных и выходных параметров;
- построение модели на основе выявленных закономерностей;
- исследование модели;
- выявление новых результатов.

Модель базируется на следующих методологических принципах, приведенных в [1, 2]:

- теоретической обоснованности;
- адекватности применяемых математических уравнений описываемым процессам;
- локальности описания сложных систем;
- достаточной аппроксимации.

Параметры модели. Анализ возможных состояний экологической системы

В качестве входных параметров модели экологической системы предлагается использовать:

Z_1 – затраты, вкладываемые в защиту окружающей среды в процессе развития производственной сферы;

Z_2 – затраты на ликвидацию последствий от воздействия производственной сферы на окружающую среду;

p – уровень приемлемого экологического риска в системе;

R – существующий в системе уровень экологического риска [3].

В качестве выходного параметра в модели принимаются суммарные затраты Z_3 для обеспечения заданного уровня экологического риска в системе.

Выполним анализ зависимостей «затраты – риск». Кривая 1 на рис. 1 отражает характерную зависимость уменьшения риска при вложении средств в защитные мероприятия в процессе развития производственной сферы. Чем больше эти затраты, тем меньше величина риска, создаваемого производственной сферой. Однако достичь нулевого значения риска в системе невозможно, поскольку любая деятельность человека потенциально опасна. Кроме этого, следует отметить, что характер кривой 1 отражает хорошо известный на практике закон убывающей эффективности [2] – дополнительные затраты ΔZ_1 с ростом Z_1 все меньше влияют на уменьшение уровня экологического риска.

Линия 2 выражает зависимость общественно-необходимых затрат на ликвидацию последствий от величины риска в системе. Для этой составляющей характерна прямо пропорциональная зависимость: чем больше риск, тем больше затраты.

Положение кривой 1 определяется только техническими характеристиками производственной сферы и отражает существующую функциональную связь: машина (выбросы) – окружающая среда (уровень загрязнения) – человек (доза). Последствия или риск от вредного воздействия вредных факторов зависят от дозы воздействия.

В противовес этому положение прямой 2 зависит от социально-экономических условий и ограничений, в которых функционирует экологическая система.

Суммарная кривая 3 – экологическая функция системы – определяется по формуле

$$\mathcal{E}(R) = Z_3 = Z_1(R) + Z_2(R). \quad (1)$$

Линия 4 – существующий в системе уровень экологического риска. Положение прямой 4 относительно минимума кривой 3 определяет возможные состояния экологической системы.

Экологическая система находится в сбалансированном состоянии в том случае, когда существующий в ней уровень экологического риска R обеспечивается минимальными суммарными затратами (рис. 1, а). В противном случае система находится в неудовлетворительном состоянии (рис. 1, б) либо в нецелесообразном состоянии (рис. 1, в). В первом случае минимум кривой 3 находится справа от линии 4, а во втором слева.

Неудовлетворительное состояние экологической системы возможно при экстенсивном пути развития производственной сферы, когда увеличение валового продукта происходит только за счет роста объема промышленного производства, что отрицательно сказывается на окружающей среде и приводит к значительному увеличению уровня экологического риска в системе. В этом случае общество вынуждено выделять больше средств на ликвидацию последствий такой производственной деятельности с целью уменьшения уровня экологического риска в системе.

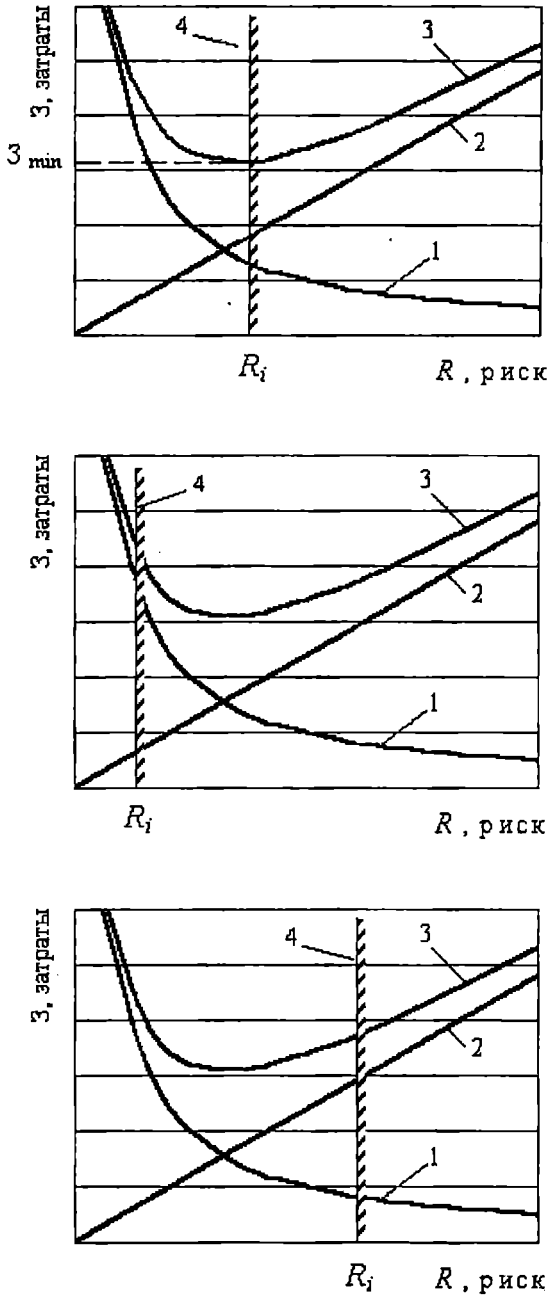


Рис. 1. Возможные состояния экологической системы:
 а) сбалансированное состояние;
 б) неудовлетворительное;
 в) нецелесообразное

На интенсивном пути развития производственной сферы темпы роста валового продукта обеспечиваются внедрением наукоемких и ресурсосберегающих технологий, что в конечном итоге приводит к уменьшению уровня экологического риска в системе. В этом случае теоретически возможно, что экологическая система будет находиться в нецелесообразном состоянии, когда большая часть средств в производственной сфере будет расходоваться на системы безопасности, что не всегда может быть выгодно обществу.

Экономически целесообразно, чтобы экологическая система находилась в сбалансированном состоянии, при котором заданный уровень экологического риска обеспечивался минимальными затратами.

Это и есть корректная постановка задачи управления экологической системой. Такой подход позволяет на научной основе реализовать на практике требования известного принципа ALARA: уровень риска должен быть настолько низким, насколько это возможно по экономическим и социальным условиям.

Математическая модель позволяет решить главную задачу при управлении экологической системой:

- минимизировать суммарные затраты в процессе управления экологической системой;
- установить критерий эффективного управления системой.

Минимизация затрат при управлении экологической системой

Рассмотрим вид функции $Z_1(R)$. Очевидно, что с увеличением Z_1 уменьшается величина риска R .

Математически эту зависимость можно представить в одном из вариантов, которые наиболее точно аппроксимируют эмпирические данные:

$$а) Z_1(R) = aR^{-b}; \quad (2)$$

$$б) Z_1(R) = \ln(1 + aR^{-b}), \quad (3)$$

где a и b – параметры, которые показывают, как быстро уменьшается уровень экологического риска с увеличением вложенных в производственную сферу затрат для безопасности экологической системы.

Экологическая функция системы $\mathcal{E}(R)$ может быть представлена в виде

$$а) \mathcal{E}(R) = aR^{-b} + kR; \quad (4)$$

$$\text{б) } \mathcal{E}(R) = \ln(1 + aR^{-b}) + kR, \quad (5)$$

где $\mathcal{Z}_2(R) = kR$ – характерная зависимость общественно-необходимых затрат на ликвидацию последствий от величины экологического риска (рис. 1).

Задача минимизации затрат в процессе управления экологической системой сводится к поиску экстремума функции $\mathcal{E}(R)$. Рассмотрим возможные решения для принятых вариантов исходных данных.

Для этого найдём производную $\mathcal{E}'_R = \frac{d\mathcal{E}}{dR}$ и приравняем её к нулю.

В результате получим:

$$\text{а) } \frac{d\mathcal{E}}{dR} = -abR^{-b-1} + k = 0; \quad (6)$$

$$\text{б) } \frac{d\mathcal{E}}{dR} = \frac{1}{1 + aR^{-b}} (-ab)R^{-b-1} + k = 0. \quad (7)$$

Откуда находим:

$$\text{а) } k = abR^{-b-1}; \quad (8)$$

$$\text{б) } k = \frac{abR^{-b-1}}{1 + aR^{-b}}. \quad (9)$$

Принимая в качестве R существующий в экологической системе уровень риска $R = R_i$ и учитывая формулы (8) и (9), находим минимальные суммарные затраты, необходимые для поддержания этого уровня:

$$\text{а) } \mathcal{E}_{\min} = aR_i^{-b}(1 + b); \quad (10)$$

$$\text{б) } \mathcal{E}_{\min} = \ln(1 + aR_i^{-b}) + b\left(1 - \frac{1}{1 + aR_i^{-b}}\right). \quad (11)$$

Полагаем, в первом приближении, $a = 1$, $b = 1$. Тогда формулы (10) и (11) принимают вид:

$$\text{а) } \mathcal{E}_{\min} = 2R_i^{-1}; \quad (12)$$

$$б) \mathcal{E}_{\min} = \ln\left(1 + \frac{1}{R_i}\right) + \frac{1}{1 + R_i}. \quad (13)$$

Критерий эффективности управления экологической системой. Свойства системы

Эффективность функционирования экологической системы может оцениваться по величине существующего в ней экологического риска. Чем меньше эта величина, тем эффективнее функционирует экологическая система, и наоборот.

Критерий эффективного управления экологической системой – достижение области приемлемого уровня экологического риска, можно представить в виде $R \leq p$, где p – установленный для данной территории уровень приемлемого экологического риска.

При этом система будет находиться в сбалансированном состоянии только в том случае, когда $R_i = p$ и при этом величина суммарных затрат минимальна т.е. $\mathcal{Z}_3 = \mathcal{E}_{\min}$ (рис.1,а).

Формулы для определения минимальных суммарных затрат в системе для обеспечения уровня приемлемого экологического риска в системе принимают вид:

$$а) \mathcal{E}_{\min} = 2p^{-1}; \quad (14)$$

$$б) \mathcal{E}_{\min} = \ln\left(1 + \frac{1}{p}\right) + \frac{1}{1 + p}. \quad (15)$$

Анализ основных зависимостей, приведенных в модели, позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Суммарные затраты в экологической системе складываются из затрат, вложенных в производственную сферу, направленных на уменьшение риска, и общественно необходимых затрат, направленных на ликвидацию последствий риска.

2. Совершенствование производственной сферы путем внедрения наукоемких и ресурсосберегающих технологий (интенсивный путь развития) способствует уменьшению экологического риска в системе.

3. Экстенсивный путь развития производственной сферы приводит к ее необоснованному расширению, что проявляется в увеличении экологического риска в системе. В этом случае затраты общества на ликвидацию последствий высокого уровня риска возрастают.

4. Сбалансированное состояние экологической системы характеризуется минимальным уровнем суммарных затрат для обеспечения в ней существующего уровня экологического риска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучин Б.Л., Якушев Е.В., *Управление развитием экономических систем: технический прогресс, устойчивость.* – М.: Экономика, 1990. – 157 с.
2. Руденко С.В., Егоров А.Ю., Гогунский В.Д. *Концептуальные основы управления проектами с учетом экологических ограничений* // *Вісник ОНМУ.* – Одеса: ОНМУ, 2004. – Вып. 14. – С. 167.
3. *Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної безпеки.* – К.: Основа, 2003. – 192 с.

Надійшла 22.05.06

ОБОСНОВАНИЕ МАРШРУТА РАБОТЫ СУДНА С УЧЁТОМ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕВОЗКИ

Разработаны теоретические и методические положения, базирующиеся на модели задачи динамического программирования, реализация которой позволяет определить оптимальный маршрут работы судна, исходя из достижения максимального значения показателя интенсивности прибыли и учитывая различный уровень достоверности исходной информации.

Ключевые слова: судоходная компания, судно, планирование, маршрут работы, динамическое программирование, интенсивность прибыли.

Актуальность темы исследования

В условиях командно-распределительной системы управления конкурентоспособность флота, высокая ликвидность основных фондов морских транспортных предприятий и гарантированная грузовая база обеспечивались государственной поддержкой и политикой протекционизма в отношении данной сферы деятельности. Это определяло специфику реализации функций управления и обуславливало широкие горизонты планирования производственной деятельности судоходных предприятий. Так, долгосрочное планирование предполагало разработку генеральных планов, охватывающих двадцатилетний временной период с разбивкой по пятилеткам. Составной частью пятилетних планов являлись годовые, которые уточнялись и корректировались оперативными – квартальными и месячными, подразделявшимися в линейном судоходстве на декадные и суточные, а в трамповом – рейсовые [1].

В связи с переходом Украины на новые методы хозяйствования принципиально изменились как внешние, так и внутренние условия деятельности всех субъектов рынка транспортных услуг. Это обусловило перенос всего комплекса принимаемых решений на уровень отдельных производственно-хозяйственных звеньев транспортной инфраструктуры страны. Плановая деятельность предприятий, занимающихся организацией перевозок и управлением работой флота, перестала базироваться на директивах, однозначно спущенных сверху. Планы сегодня разрабатываются, исходя из возможностей компаний, и обеспечиваются за счет их собственных или привлеченных средств. При этом ответственность за

результаты полностью несут сами предприятия. В связи с этим реализация функции планирования усложняется. Это обуславливает необходимость разработки принципиально новых научно-теоретических и практических подходов к решению многих производственных задач, среди которых ключевое значение имеют задачи, связанные с формированием загрузки отдельных судов и обоснованием вариантов их работы.

Краткий обзор литературы по теме исследования

Методы формирования графиков работы флота с использованием имитационных моделей предлагаются в публикациях [2, 3]. Приведённые в них модели основаны на эвристических алгоритмах и носят статический характер.

Для определения маршрутов движения тоннажа в работах [1, 4, 5, 6] применяется транспортная задача линейного программирования. В качестве критерия оптимальности в соответствующей экономико-математической модели выступает минимизация балластных переходов судна. Использование такого подхода оставляет без внимания временной аспект работы транспортного средства.

Особенность решения задачи маршрутизации в публикациях [7, 8] заключается в поэтапном формировании маршрутов, каждый из которых представляет собой последовательность простых рейсов. При этом формирование маршрутов работы судов осуществляется одновременно с расстановкой флота. В связи с этим лицу, принимающему решение (ЛПР), приходится оперировать плановыми, а не расчетными, величинами грузоподъемности транспортных средств. Назначение судов в рейс при этом осуществляется на каждом шаге с использованием экономико-математической модели линейного программирования. При этом каждое последующее назначение судна в рейс не учитывает параметры предыдущего.

Существенным недостатком всех моделей, представленных в вышеупомянутых исследованиях, является то, что они статичны, не учитывают временной аспект работы судна и динамику постоянно изменяющихся условий внешней среды.

В монографии [9] предложен алгоритм формирования графика работы флота, который базируется на сочетании эвристического подхода и фундаментальных принципов динамического программирования. При этом процесс подготовки решений о предстоящей работе судов ориентирован на месячный уровень достоверности исходной информации, а в качестве целевой функции обозначена функция аддитивного показателя расходов.

В работе [10] формализована методика построения вариантов работы судна, которая основана на положениях теории множеств и теории графов. Она выдвигается в качестве рабочей гипотезы и трактуется как интерпретация классических правил формирования схем

движения судов. В этом исследовании также сформулированы теоретические положения по выбору оптимального варианта работы судна. В их основе лежит модель задачи динамического программирования, которая учитывает пространственно-временные параметры работы судна. Однако теоретические аспекты механизма её практической реализации не находят должного отражения в этой работе.

Цель исследования

Повышение эффективности реализации функции планирования производственной деятельности судоходной компании путём разработки теоретических и методических положений по обоснованию маршрута работы судна с учётом динамики развития процесса перевозки.

Исходя из цели, поставлены следующие задачи:

- сформулировать постановку задачи и разработать модель, относящуюся к классу задач динамического программирования, реализация которой позволит при различном уровне достоверности исходной информации и на основании параметров предыдущего периода принимать решения о предстоящей работе судна;
- рассмотреть технологию проведения рекуррентной процедуры практической реализации модели динамического программирования, в которой критерием оптимальности выступает показатель, не являющийся аддитивным.

Основная часть исследования

Сегодня, в условиях радикально изменившейся политической и экономической среды, нельзя чётко и однозначно для всех судоходных компаний дифференцировать процесс планирования с точки зрения временных аспектов разработки и реализации планов. То, что для одних компаний является краткосрочным планированием, для других, учитывая динамично изменяющиеся условия их функционирования, отождествляется с долгосрочным. Поэтому традиционно принятые горизонты планирования, без конкретизации их продолжительности, могут быть обозначены каждой судоходной компанией с позиции полноты и достоверности исходной информации.

Учитывая эту точку зрения, каждый период планирования в данном исследовании интерпретируется как определенный шаг $h = 1, 2, \dots, H + 1$ или этап принятия решения по обоснованию маршрута работы судна.

Первый шаг, без уточнения его временных рамок, соотносится с уровнем текущего планирования, на котором решения принимаются с учетом производственных возможностей судоходной компании и на основании полученных заявок грузоотправителей, заключенных договоров и контрактов.

Второй шаг соответствует уровню долгосрочного планирования, на котором решения производственных задач базируются на информации, полученной с использованием методов теории вероятности, математической статистики и теории игр.

В общем случае количество шагов или этапов принятия решений, связанных с перспективным планированием, зависит от условий, в которых работает судоходная компания, от достоверности исходной информации и возможности её получить, а также от уровня квалификации и профессионализма ЛПР.

Изложенный подход к планированию работы флота, не нарушая традиционно принятых в отечественной транспортной науке и практике канонов, обеспечивает соблюдение принципа непрерывности управления. Текущий этап принятия решений переходит в ретроспективный, перспективный – становится текущим, а далее следует перспективный.

В целом процесс обоснования маршрута работы судна производится по следующей обобщённой схеме.

В зависимости от даты освобождения судна и его географического местоположения, пунктов отправления и назначения, структуры и величины грузопотока, шага и продолжительности соответствующего ему периода для судна устанавливается множество возможных вариантов его работы $G' = \{g'_1, g'_2, \dots, g'_n\}$ [10].

Из множества возможных вариантов G' выделяются те, которые исходя из технических, эксплуатационных и коммерческих условий работы судна, являются допустимыми $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, $G \subset G'$.

Из полученного множества допустимых вариантов G в соответствии с избранным критерием устанавливается оптимальный $g_{opt} \in G$.

Наглядно формирование допустимых вариантов работы судна представляется с помощью ориентированного графа $G = [A, L]$ (рис. 1), в котором A – множество вершин (узлов), L – множество ребер. Узлы и ребра графа $G = [A, L]$ дифференцируются по шагам $h = 1, 2, \dots, H + 1$, каждый из которых, как указывалось ранее, соответствует определенному периоду планирования, т. е. этапу принятия решения о переходе от одной вершины графа к другой. Каждое ребро $l_{ab}(h) \in L(h)$ соотносится с определенной схемой движения l_{ab} на шаге h , где a – порт, соответствующий началу схемы; b – её окончанию.

Началом всех схем движения, представленных дугами $l_{ab}(h) \in L(h)$, являются соответствующие вершины (узлы) $a(h) \in A(h)$ графа. Каждый узел отражает определенное состояние $U_a(h)$ системы на шаге h .

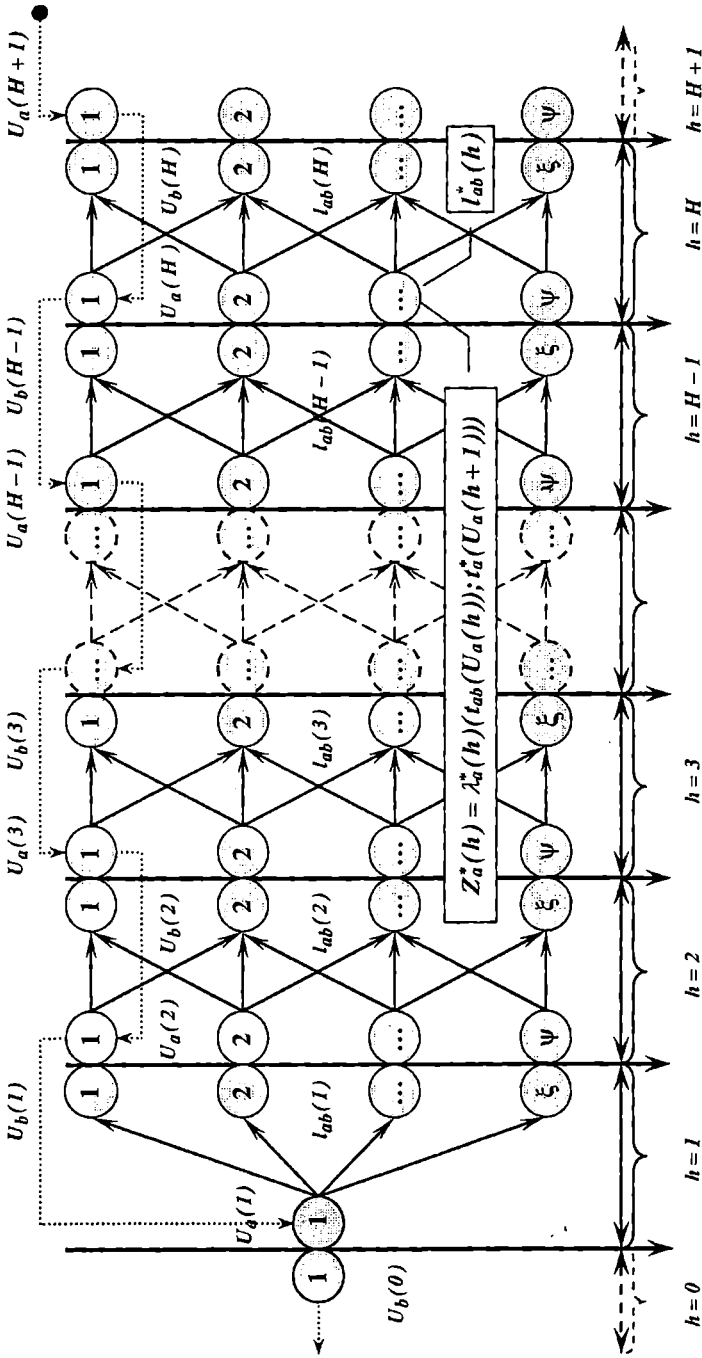


Рис. 1. Граф маршрутов $G = [A, L]$

Каждая вершина $a(h) \in A(h)$, являясь началом схемы движения $l_{ab}(h) \in L(h)$ на шаге h , одновременно выступает окончанием $b(h-1) \in A(h-1)$ предыдущей схемы $l_{ab}(h-1) \in L(h-1)$ и соответствует состоянию $U_b(h-1)$. Окончание $b(h) \in A(h)$ каждой схемы движения $l_{ab}(h) \in L(h)$, отражающее состояние $U_b(h)$, является так же и началом следующей схемы $l_{ab}(h+1) \in L(h+1)$ на шаге $h+1$, т. е. узел $b(h) \in A(h)$ идентичен узлу $a(h+1) \in A(h+1)$. Следовательно, состояние $U_b(h)$ системы соответствует состоянию $U_a(h+1)$.

Истоком графа G (рис. 1) (вершиной, которой инцидентны только исходящие дуги) является точка, соответствующая состоянию $U_a(1)$ системы. Оно определяется временем и местом освобождения рассматриваемого судна от обязательств предыдущего периода. Причём, чем дальше стоки графа (полюса, которым инцидентны только заходящие дуги) отдалены от его истока, тем шире горизонт планирования.

Граф G является взвешенным, поскольку каждому его ребру отвечает определенный параметр – вес или длина, т. е. число или несколько чисел, поставленных в соответствие этому ребру. В данном случае для определения графа $G = [A, L]$ на каждом шаге $h = 1, 2, \dots, H + 1$ строится матрица весов

$$D(h) = \{\Phi_{ab}(h), t_{ab}(h), \lambda_{ab}(h)\}, \quad (1)$$

где $\Phi_{ab}(h)$ – прибыль, получаемая судном на шаге h , тыс. долл. США

$$(\cdot 10^3 \$), \quad \Phi_{ab}(h) = F_{ab}(h) - R_{ab}(h);$$

$t_{ab}(h)$ – время, за которое получена прибыль, сут.;

$\lambda_{ab}(h)$ – интенсивность прибыли, $\cdot 10^3 \$$;

$F_{ab}(h), R_{ab}(h)$ – доход и соответственно расходы судна на шаге $h, \cdot 10^3 \$$.

Таким образом, матрица весов для определения графа на соответствующем шаге имеет следующий вид:

- на шаге $h = 1$: $D(1) = \{\Phi_{ab}(1), t_{ab}(1), \lambda_{ab}(1)\}$, (табл. 1);
- на шаге $h = 2$: $D(2) = \{\Phi_{ab}(2), t_{ab}(2), \lambda_{ab}(2)\}$, (табл. 2).

Таблица 1

Матрица весов для определения графа G на шаге h = 1

| | | | | | | | | |
|--|--|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|------------------|---------------------|
| Состояние системы в узле $a(1) \in A(1)$ | Состояние системы в узле $b(1) \in A(1)$ | | | | | | | |
| | $U_1(1)$ | | $U_2(1)$ | | $U_3(1) \dots$ | | $U_\xi(1)$ | |
| $U_1(1)$ | $\Phi_{11}(1)$ | | $\Phi_{12}(1)$ | | $\Phi_{13}(1)$ | | $\Phi_{1\xi}(1)$ | |
| | $t_{11}(1)$ | $\lambda_{11}(1)$ | $t_{12}(1)$ | $\lambda_{12}(1)$ | $t_{13}(1)$ | $\lambda_{13}(1)$ | $t_{1\xi}(1)$ | $\lambda_{1\xi}(1)$ |

Таблица 2

Матрица весов для определения графа G на шаге h = 2

| | | | | | | | | |
|--|--|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| Состояние системы в узле $a(2) \in A(2)$ | Состояние системы в узле $b(2) \in A(2)$ | | | | | | | |
| | $U_1(2)$ | | $U_2(2)$ | | $U_3(2) \dots$ | | $U_\xi(2)$ | |
| $U_1(2)$ | $\Phi_{11}(2)$ | | $\Phi_{12}(2)$ | | $\Phi_{13}(2)$ | | $\Phi_{1\xi}(2)$ | |
| | $t_{11}(2)$ | $\lambda_{11}(2)$ | $t_{12}(2)$ | $\lambda_{12}(2)$ | $t_{13}(2)$ | $\lambda_{13}(2)$ | $t_{1\xi}(2)$ | $\lambda_{1\xi}(2)$ |
| $U_2(2)$ | $\Phi_{21}(2)$ | | $\Phi_{22}(2)$ | | $\Phi_{23}(2)$ | | $\Phi_{2\xi}(2)$ | |
| | $t_{21}(2)$ | $\lambda_{21}(2)$ | $t_{22}(2)$ | $\lambda_{22}(2)$ | $t_{23}(2)$ | $\lambda_{23}(2)$ | $t_{2\xi}(2)$ | $\lambda_{2\xi}(2)$ |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| $U_\psi(2)$ | $\Phi_{\psi 1}(2)$ | | $\Phi_{\psi 2}(2)$ | | $\Phi_{\psi 3}(2)$ | | $\Phi_{\psi \xi}(2)$ | |
| | $t_{\psi 1}(2)$ | $\lambda_{\psi 1}(2)$ | $t_{\psi 2}(2)$ | $\lambda_{\psi 2}(2)$ | $t_{\psi 3}(2)$ | $\lambda_{\psi 3}(2)$ | $t_{\psi \xi}(2)$ | $\lambda_{\psi \xi}(2)$ |

Для определения оптимального маршрута работы судна, исходя из допустимых вариантов (рис. 1), установленных ранее, и их параметров (табл. 1, 2), требуется реализовать следующую модель задачи динамического программирования:

$$Z = \lambda(H + 1; X_{ab}(U_a(h))) \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$(h = 1, 2, \dots, H + 1; a(h) \in A(h); (a(h), b(h)) = l_{ab}(h) \in L(h));$$

$$\lambda_a(U_a(h)) = \frac{\Phi_{ab}(U_a(h-1)) \cdot X_{ab}(U_a(h-1)) + \lambda_a^*(U_a(h-1)) \cdot \sum_{h=1}^{H+1} \sum_{a \in A(h-1)} t_a^*(U_a(h-1))}{t_{ab}(U_a(h-1)) + \sum_{h=1}^{H+1} \sum_{a \in A(h-1)} t_a^*(U_a(h-1))}$$

$$\cdot [Z_{ab}(U_a(h-1)) + P_{ab}(U_a(h-1)) \cdot E_{ab}(U_a(h-1))], \quad (3)$$

$$(h = 1, 2, \dots, H + 1; a(h) \in A(h); (a(h), b(h)) = l_{ab}(h) \in L(h));$$

$$X_{ab}(U_a(h)) \in \{ 0, 1 \}, \quad (4)$$

$$(h = 1, 2, \dots, H + 1; a(h) \in A(h); (a(h), b(h)) = l_{ab}(h) \in L(h));$$

$$\sum_{a \in A(h)} X_{ab}(U_a(h)) = 1, \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 & (h = 1, 2, \dots, H + 1; a(h) \in A(h); (a(h), b(h)) = l_{ab}(h) \in L(h)); \\
 & \lambda_a(U_a(H + 1)) = \lambda_b(U_b(H)) = 0, \tag{6} \\
 & (h = 1, 2, \dots, H + 1; a(H + 1) \in A(H + 1); b(H) \in A(H)),
 \end{aligned}$$

где $\lambda_a(U_a(h))$ – интенсивность получения прибыли в каждом состоянии системы $U_a(h)$ на шаге h ;

X_{ab} – параметр управления, который принимает следующие значения:

$$X_{ab}(U_a(h)) = \begin{cases} 1, & \text{если схема движения } l_{ab} \text{ выбирается в состоянии} \\ & \text{системы } U_a(h) \text{ на шаге } h; \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

$\Phi_{ab}(U_a(h-1))$ – прибыль, получаемая судном на схеме l_{ab} в каждом состоянии системы $U_a(h-1)$ на шаге $h-1$;

$\lambda_a^*(U_a(h-1))$ – оптимальная величина интенсивности получения прибыли в каждом состоянии системы $U_a(h-1)$ на шаге $h-1$;

$t_a^*(U_a(h-1))$ – период времени, соответствующий установленному на шаге $h-1$ оптимальному значению интенсивности получения прибыли;

$t_{ab}(U_a(h-1))$ – время работы судна на схеме l_{ab} , начало которой характеризуется состоянием системы $U_a(h-1)$;

$P_{ab}(U_a(h-1))$ – вероятность появления грузопотока на шаге $h-1$ в рассматриваемой точке пространства.

$Z_{ab}(U_a(h-1)), E_{ab}(U_a(h-1))$ – эндогенные параметры, которые принимают следующие значения:

$$Z_{ab}(U_a(h-1)) = \begin{cases} 1, & \text{если выбор схемы движения } l_{ab} \text{ на шаге } h-1 \text{ в} \\ & \text{состоянии системы } (U_a(h-1)) \text{ осуществляется в} \\ & \text{результате обработки и анализа информации,} \\ & \text{полученной на основании имеющихся заявок,} \\ & \text{заключённых контрактов и договоров;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

$$E_{ab}(U_a(h-1)) = \begin{cases} 1, & \text{если в основе выбора схемы движения } l_{ab} \text{ на} \\ & \text{шаге } h-1 \text{ в состоянии системы } (U_a(h-1)) \\ & \text{лежит информация, полученная с помощью} \\ & \text{методов теории вероятности, математической} \\ & \text{статистики и/или теории игр;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

Целевая функция (2) определяет такое решение, которое обеспечивает максимальное значение показателя интенсивности прибыли по всем схемам, входящим в рассматриваемый плановый период. Таким образом, выбранный критерий оптимальности учитывает не только доходы и расходы судна, но и временной интервал, за который будут получены эти финансовые показатели. Целесообразность максимизации функции (2) можно продемонстрировать на примере следующей гипотетической ситуации. Прибыль, получаемая в результате работы судна на условной схеме движения I_1 в течение месяца, составляет $300 \cdot 10^3$ \$. Прибыль же в размере $200 \cdot 10^3$ \$ обеспечивается при работе судна в течение недели на схеме I_2 . При максимизации функции прибыли решение задачи приведёт к тому, что в качестве оптимального будет выбран первый вариант работы судна, обеспечивающий получение большего значения соответствующего аддитивного показателя. При этом время его получения останется без внимания. В связи с этим, очевидно, что учёт временных параметров оказывает существенное влияние на эффективность принимаемых решений.

Уравнение (3) описывает процесс движения системы. В каждом узле графа $U_a(h)$ определяется показатель $\lambda_a(U_a(h))$, не являющийся аддитивным. Следовательно, суммирование показателей $\lambda_a^*(U_a(h-1))$, полученных на предыдущих этапах решения, лишено смысла. Однако для того, чтобы на шаге h учесть параметры ретроспективных периодов работы судна, реализуется процесс двойного перехода: от относительного показателя $\lambda_a^*(U_a(h-1))$, являющегося оптимальным на шаге $h-1$, к абсолютному – $\Phi_a^*(U_a(h-1))$, а затем – обратно. В процессе обратного перехода устанавливается значение показателя $\lambda_a(U_a(h))$ в узле графа $U_a(h)$ на шаге h уже с учётом временных и финансовых параметров всех предыдущих периодов.

Запись (4) отражает возможные значения $\{0, 1\}$ параметра управления.

Выражение (5) обеспечивает выбор единственного управляющего решения $X_{ab}(U_a(h)) = 1$ в каждом из состояний $U_a(h)$ на шаге h . В связи с этим сумма всех значений параметра управления принимается равной 1. В противном случае, результаты реализации модели (2)-(6) будут противоречить техническому потенциалу рассматриваемого судна, пространственно-временным параметрам его работы и организационным возможностям аппарата управления.

Уравнение (6) характеризует граничные значения показателя качества. Поскольку рассматриваемый процесс завершается на шаге H

(рис. 1), то все значения параметра управления на шаге $H + 1$ в любом состоянии $U_a(H + 1) = U_b(H)$ равны θ .

Для реализации решения поставленной задачи используем принцип оптимальности Р. Беллмана [11, 12], характерной чертой которого является движение от конца процесса, т. е. от стоков графа.

В общем виде рекуррентное уравнение алгоритма обратной прогонки для определения оптимального маршрута $g_{opt} \in G$ работы судна можно представить следующим образом:

$$Z_a^*(H - h - 1) = \max_{X_{ab}(U_a(H-h-1)) \in X_a(H-h-1)}$$

$$\left\{ \frac{\Phi_{ab}(U_a(H-h-1)) \cdot X_{ab}(U_a(H-h-1)) + \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{a \in A(H-h)} Z_a^*(H-h) \cdot t_a^*(H-h)}{t_{ab}(U_a(H-h-1)) + \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{a \in A(H-h)} t_a^*(H-h)} \right\} \quad (7)$$

$$(a(H-h-1) \in A(H-h-1); (a(H-h-1), b(H-h-1)) = l_{ab}(H-h-1) \in L(H-h-1))$$

Процедура движения от конца к началу промежутка $(\theta; H + 1)$ продолжается до получения значения $Z_a^*(1)$ или идентичного ему $Z_b^*(\theta)$.

В ходе реализации алгоритма над каждой из вершин $U_a(h)$ графа G (рис. 1), проставляются следующие данные: значение целевой функции $Z_a^*(h) = \lambda_a^*(h)$, соответствующие ему параметры времени $t_{ab}(U_a(h)); t_a^*(U_a(h + 1))$ и схема движения $l_{ab}^*(h)$:

$$Z_a^*(h) = \lambda_a^*(h)(t_{ab}(U_a(h)); t_a^*(U_a(h + 1))), l_{ab}^*(h), \quad (8)$$

где $t_{ab}(U_a(h))$ – время, соответствующее схеме движения $l_{ab}^*(h)$, которая обеспечивает оптимальное значение величины $\lambda_a^*(h)$ на шаге h , сут.;

$t_a^*(U_a(h + 1))$ – время, соответствующее схеме движения $l_{ab}^*(h + 1)$, которая обеспечивает значение величины $\lambda_a^*(h + 1)$ на шаге $h + 1$, сут.

Результаты реализации каждого этапа алгоритма обратной прогонки представляются в табличной форме. Каждая ячейка предлагаемой таблицы имеет следующую структуру (табл. 3).

В центре ячейки размещается значение показателя $\lambda_a^*(h)$, соответствующее состоянию системы $U_a(h)$ на шаге h .

В верхнем левом углу – значение промежутка времени $t_{ab}(h)$, в течение которого обеспечивается получение $\lambda_a^*(h)$.

В верхнем правом углу – схема движения $l_{ab}^*(h)$, соответствующая $\lambda_a^*(h)$.

Таблица 3

Структура ячейки таблицы результатов

| | |
|------------------|---------------|
| h | |
| $t_{ab}(h)$ | $l_{ab}^*(h)$ |
| $\lambda_a^*(h)$ | $t_a^*(h+1)$ |
| | ... |
| | $t_a^*(H+1)$ |
| $t_a^*(h)$ | |

В нижнем правом углу – значения промежутков времени $t_a^*(h+1)$, $t_a^*(h+2)$, ..., $t_a^*(H+1)$, которые отвечают следующим параметрам: $\lambda_a^*(h+1)$, $\lambda_a^*(h+2)$, ..., $\lambda_a^*(H+1)$.

Сумма периодов времени, находящихся в ячейке в левом верхнем и в правом нижнем углах, соответствует показателю $t_a^*(h)$. Его значение устанавливается в состоянии системы $U_a(h)$ и размещается в левом нижнем углу. Показатель $t_a^*(h)$ отражает общую продолжительность такого варианта работы судна на промежутке $(h; H+1)$, который является для данного состояния системы оптимальным. Он определяется по следующей формуле:

$$t_a^*(h) = t_{ab}(h) + t_a^*(h+1) + t_a^*(h+2) + \dots + t_a^*(H+1). \tag{9}$$

Предлагаемая таблица результатов позволяет получить комплексное представление о временных и финансовых параметрах работы судна на каждом шаге и может быть использована с целью последующего уточнения схем движения, входящих в оптимальный маршрут работы судна.

Рассмотрим процедуру численной реализации предложенной модели (2)-(6) на условном примере. Сделаем допущение, что все необходимые для решения задачи данные установлены на предварительном этапе подготовки исходной информации. С целью наглядной демонстрации целесообразности выбора критерия оптимальности, все значения

параметра Φ_{ab} в исходных матрицах (табл. 4), определяющих граф G (рис. 2), условно принимаем равными $150 \cdot 10^3$ \$.

Таблица 4

Матрицы $D(h) = \{ \Phi_{ab}(h), t_{ab}(h), \lambda_{ab}(h) \}$, определяющие граф G

| Матрица весов $D(1) = \{ \Phi_{ab}(1), t_{ab}(1), \lambda_{ab}(1) \}$ для определения графа на шаге $h = 1$ | | | | | | |
|---|--|----------------------|----------|------|----------|------|
| Состояние системы в узле $a(1) \in A(1)$ | Состояние системы в узле $b(1) \in A(1)$ | | | | | |
| | $U_1(1)$ | | $U_2(1)$ | | $U_3(1)$ | |
| $U_1(1)$ | $\Phi_{ab(1)}=150$ | | 150 | | 150 | |
| | $t_{ab(1)}=15$ | $\lambda_{ab(1)}=10$ | 13 | 11,5 | 10 | 15 |
| Матрица весов $D(2) = \{ \Phi_{ab}(2), t_{ab}(2), \lambda_{ab}(2) \}$ для определения графа на шаге $h = 2$ | | | | | | |
| Состояние системы в узле $a(2) \in A(2)$ | Состояние системы в узле $b(2) \in A(2)$ | | | | | |
| | $U_1(2)$ | | $U_2(2)$ | | $U_3(2)$ | |
| $U_1(2)$ | 150 | | 150 | | 0 | |
| | 18 | 8,33 | 20 | 7,5 | 0 | 0 |
| $U_2(2)$ | 150 | | 150 | | 150 | |
| | 15 | 10 | 14 | 10,7 | 13 | 11,5 |
| $U_3(2)$ | 0 | | 150 | | 150 | |
| | 0 | 0 | 10 | 15 | 11 | 13,6 |
| Матрица весов $D(3) = \{ \Phi_{ab}(3), t_{ab}(3), \lambda_{ab}(3) \}$ для определения графа на шаге $h = 3$ | | | | | | |
| Состояние системы в узле $a(3) \in A(3)$ | Состояние системы в узле $b(3) \in A(3)$ | | | | | |
| | $U_1(3)$ | | $U_2(3)$ | | $U_3(3)$ | |
| $U_1(3)$ | 150 | | 150 | | 0 | |
| | 15 | 10 | 13 | 11,5 | 0 | 0 |
| $U_2(3)$ | 150 | | 150 | | 150 | |
| | 11 | 13,6 | 13 | 11,5 | 14 | 10,7 |
| $U_3(3)$ | 0 | | 150 | | 150 | |
| | 0 | 0 | 16 | 9,38 | 17 | 8,82 |

Поскольку рассматриваемый процесс завершается на шаге $h = 4$ (рис. 2), то все значения параметров на шаге $h = 5$ равны 0. Следовательно, значения функционалов $Z_a(5)$ в любом состоянии $U_a(5)$ также равны 0: $\lambda_a^*(5) = 0$.

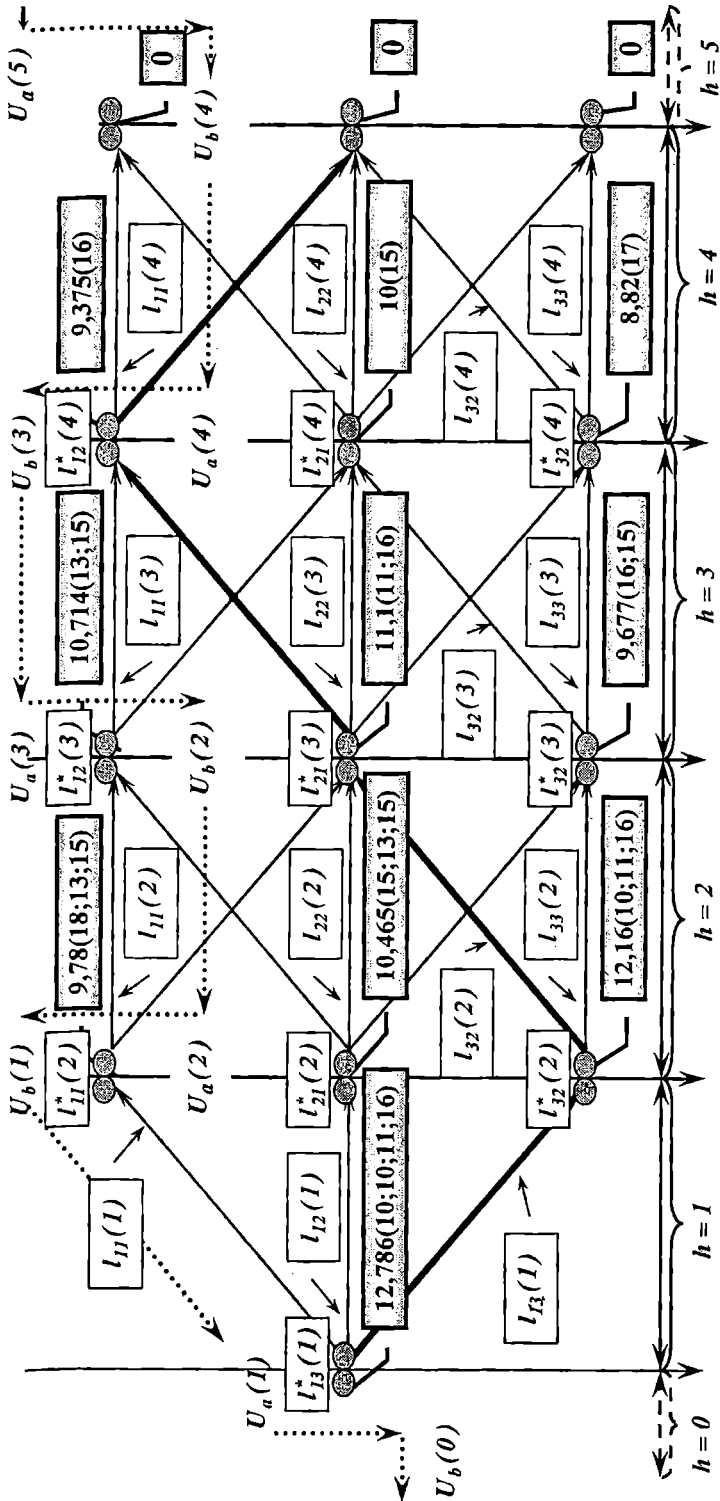


Рис. 2. Граф маршрутов расчётного примера

Определяем значения функционалов в каждом из состояний $U_a(4)$.

$$\begin{aligned} \lambda_1^*(4) &= \max \left\{ \lambda_{11}(4) + 0; \lambda_{12}(4) + 0 \right\} = \\ &= \max \left\{ 8,33 + 0; 9,375 + 0 \right\} = 9,375 (t_{12}(4) = 16); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \lambda_2^*(4) &= \max \left\{ \lambda_{21}(4) + 0; \lambda_{22}(4) + 0; \lambda_{23}(4) + 0 \right\} = \\ &= \max \left\{ 10; 7,895; 8,33 \right\} = 10 (t_{21}(4) = 15); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \lambda_3^*(4) &= \max \left\{ \lambda_{32}(4) + 0; \lambda_{33}(4) + 0 \right\} = \\ &= \max \left\{ 8,82; 8,33 \right\} = 8,82 (t_{32}(4) = 17). \end{aligned} \quad (12)$$

В результате расчётов устанавливаем, что в состояниях системы:

- $U_1(4)$ оптимальное значение показателя $\lambda_1^*(4) = 9,375 \cdot 10^3$ \$ обеспечивается работой судна на схеме $t_{12}^*(4)$, время работы судна $t_{12}(4)$ на этой схеме составляет 16 суток;
- $U_2(4)$ оптимальное значение $\lambda_2^*(4) = 10 \cdot 10^3$ \$ обеспечивается работой судна на схеме $t_{21}^*(4)$, время работы судна $t_{21}(4)$ на этой схеме составляет 15 суток;
- $U_3(4)$ оптимальное значение $\lambda_3^*(4) = 8,82 \cdot 10^3$ \$ обеспечивается работой судна на схеме $t_{32}^*(4)$, время работы судна $t_{32}(4)$ на этой схеме составляет 17 суток;

Результаты расчётов, полученные на каждом этапе, отражаются на графе (рис. 2) и представляются в табличной форме (табл. 5).

Устанавливаем оптимальные параметры, соответствующие состоянию системы $U_1(3)$ на шаге $h = 3$.

$$\begin{aligned} \lambda_1^*(3) &= \max \left\{ \frac{\Phi_{11}(3) + \lambda_1^*(4) \cdot t_1^*(4)}{t_{11}(3) + t_1^*(4)}; \frac{\Phi_{12}(3) + \lambda_2^*(4) \cdot t_2^*(4)}{t_{12}(3) + t_2^*(4)} \right\} = \\ &= \max \left\{ \frac{150 + 9,375 \cdot 16}{15 + 16}; \frac{150 + 10 \cdot 15}{13 + 15} \right\} = \\ &= \max \left\{ 9,677; 10,714 \right\} = 10,714 (t_{12}(3) = 13; \\ & \quad t_2^*(4) = 15; t_1^*(3) = 28) \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, в состоянии системы $U_1(3)$ значение целевой функции $\lambda_1^*(3)$, равное $10,714 \cdot 10^3$ \$ в сутки, соответствует схеме

движения $I_{12}^*(3)$. Время работы судна $t_{12}(3)$ на этой схеме составляет 13 суток. Оптимальное значение $\lambda_1^*(3)$ на шаге $h = 3$ получено с учётом показателя $\lambda_1^*(4)$. Следовательно, установленное значение критерия оптимальности $\lambda_1^*(3)$ обеспечивается не только за счёт схемы движения $I_{12}^*(3)$, но и с учётом схемы $I_{12}^*(4)$. В связи с этим, показатель $t_1^*(3)$ в состоянии системы $U_1(3)$ равен:

$$t_1^*(3) = t_{12}(3) + t_2^*(4) = 13 + 15 = 28 \text{ сут.}$$

Таблица 5

*Результаты реализации алгоритма обратной прогонки
для обоснования маршрута работы судна*

| $h=1$ | | $h=2$ | | $h=3$ | | $h=4$ | |
|--------|-------------|--------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| | | 18 | $I_{11}(2)$ | 13 | $I_{12}(3)$ | 16 | $I_{12}(4)$ |
| | | 9,783 | | 13 | 10,714 | | 9,375 |
| | | 46 | 15 | 28 | 15 | 16 | 0 |
| 10 | $I_{13}(1)$ | 15 | $I_{21}(2)$ | 11 | $I_{21}(3)$ | 15 | $I_{21}(4)$ |
| | 10 | | | | | | |
| 12,766 | 11 | 10,465 | 13 | 11,11 | | 10 | |
| | 16 | | | | | | |
| 47 | | 43 | 15 | 27 | 16 | 15 | 0 |
| | | 10 | $I_{32}(2)$ | 16 | $I_{32}(3)$ | 17 | $I_{32}(4)$ |
| | | 12,16 | | 9,677 | | 8,82 | |
| | | | 11 | | | | |
| | | 37 | 16 | 31 | 15 | 17 | 0 |

Продолжаем численную реализацию задачи, рассуждая аналогичным образом.

$$\lambda_2^*(3) = \max \left\{ \frac{\Phi_{21}(3) + \lambda_1^*(4) \cdot t_1^*(4)}{t_{21}(3) + t_1^*(4)}; \frac{\Phi_{22}(3) + \lambda_2^*(4) \cdot t_2^*(4)}{t_{22}(3) + t_2^*(4)}; \frac{\Phi_{23}(3) + \lambda_3^*(4) \cdot t_3^*(4)}{t_{23}(3) + t_3^*(4)} \right\} =$$

$$= \max \left\{ \frac{150 + 9,376 \cdot 16}{11 + 16}; \frac{150 + 10 \cdot 15}{13 + 15}; \frac{150 + 8,82 \cdot 17}{14 + 17} \right\} =$$

$$= \max \{ 11,11; 10,711; 9,677 \} = 11,11 (t_{21}(3) = 11); \quad (14)$$

$$t_1^*(4) = 16; t_2^*(3) = 27);$$

$$\begin{aligned} \lambda_3^*(3) &= \max \left\{ \frac{\Phi_{32}(3) + \lambda_2^*(4) \cdot t_2^*(4)}{t_{32}(3) + t_2^*(4)}; \frac{\Phi_{33}(3) + \lambda_3^*(4) \cdot t_3^*(4)}{t_{33}(3) + t_3^*(4)} \right\} = \\ &= \max \left\{ \frac{150 + 10 \cdot 16}{16 + 15}; \frac{150 + 8,82 \cdot 17}{17 + 17} \right\} = \max \{ 9,677; 8,823 \} = \\ &= 9,677 (t_{32}(3) = 16; t_2^*(4) = 15; t_3^*(3) = 31). \end{aligned} \quad (15)$$

На шаге $h = 2$ соответствующие значения целевой функции $Z_a(2)$ определяем из выражений:

$$\begin{aligned} \lambda_1^*(2) &= \max \left\{ \frac{\Phi_{11}(2) + \lambda_1^*(3) \cdot t_1^*(3)}{t_{11}(2) + t_1^*(3)}; \frac{\Phi_{12}(2) + \lambda_2^*(3) \cdot t_2^*(3)}{t_{12}(2) + t_2^*(3)} \right\} = \\ &= \max \left\{ \frac{150 + 10,714 \cdot (13 + 15)}{18 + 13 + 15}; \frac{150 + 11,11 \cdot (11 + 16)}{20 + 11 + 16} \right\} = \\ &= \max \{ 9,783; 9,574 \} = 9,783 (t_{11}(2) = 18; \\ & \quad t_1^*(3) = 13 + 15; t_1^*(2) = 46); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \lambda_2^*(2) &= \max \left\{ \frac{\Phi_{21}(2) + \lambda_1^*(3) \cdot t_1^*(3)}{t_{21}(2) + t_1^*(3)}; \right. \\ & \quad \left. \frac{\Phi_{22}(2) + \lambda_2^*(3) \cdot t_2^*(3)}{t_{22}(2) + t_2^*(3)}; \frac{\Phi_{23}(2) + \lambda_3^*(3) \cdot t_3^*(3)}{t_{23}(2) + t_3^*(3)} \right\} = \\ &= \max \{ 10,465; 6,338; 10,22 \} = 10,465 (t_{21}(2) = 15; \\ & \quad t_1^*(3) = 13 + 15; t_2^*(2) = 43); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \lambda_3^*(2) &= \max \left\{ \frac{\Phi_{32}(2) + \lambda_2^*(3) \cdot t_2^*(3)}{t_{32}(2) + t_2^*(3)}; \frac{\Phi_{33}(2) + \lambda_3^*(3) \cdot t_3^*(3)}{t_{33}(2) + t_3^*(3)} \right\} = \\ &= \max \left\{ \frac{150 + 11,11 \cdot (11 + 16)}{10 + 11 + 16}; \frac{150 + 9,677 \cdot (16 + 15)}{11 + 16 + 15} \right\} = \\ &= \max \{ 12,16; 10,71 \} = 12,16 (t_{32}(2) = 10; \\ & \quad t_2^*(3) = 11 + 16; t_3^*(2) = 37). \end{aligned} \quad (18)$$

Переходим к шагу $h = 1$.

$$\begin{aligned} \lambda_1^*(1) &= \max \left\{ \frac{\Phi_{11}(1) + \lambda_1^*(2) \cdot t_1^*(2)}{t_{11}(1) + t_1^*(2)}; \right. \\ &\left. \frac{\Phi_{12}(1) + \lambda_2^*(2) \cdot t_2^*(2)}{t_{12}(1) + t_2^*(2)}; \frac{\Phi_{13}(1) + \lambda_3^*(2) \cdot t_3^*(2)}{t_{13}(1) + t_3^*(2)} \right\} = \\ &= \max \left\{ \frac{150 + 9,782 \cdot (18 + 13 + 15)}{15 + 18 + 13 + 15}; \right. \\ &\left. \frac{150 + 10,465 \cdot (15 + 13 + 15)}{13 + 15 + 13 + 15}; \frac{150 + 12,16 \cdot (10 + 11 + 16)}{10 + 10 + 11 + 16} \right\} = \\ &= \max \{ 9,836; 10,714; \underline{12,766} \} = 12,766 (t_{13}(1) = 10; \\ &t_3^*(2) = 10 + 11 + 16; t_1^*(1) = 47). \end{aligned} \quad (19)$$

Далее уточняем, из каких схем движения состоит оптимальный маршрут работы судна, который обеспечивает получение $12,766 \cdot 10^3$ \$ в сутки. Эту процедуру осуществляем, руководствуясь одним из следующих вариантов:

Вариант 1 связан с использованием графического материала, а именно графа маршрутов (рис. 2) или таблицы результатов (табл. 5). При его реализации, процедура движения начинается от истока графа или от соответствующей ему ячейки в таблице результатов. Ориентируясь на схему движения $l_{ab}^*(h)$, обозначенную над узлом $a(h)$ графа или в правом верхнем углу ячейки, осуществляется переход к вершине $b(h)$ графа или к соответствующей ей ячейке в таблице результатов. Далее процедура повторяется аналогичным образом до момента уточнения всех схем движения, входящих в маршрут $g_{onm} \in G$ и обеспечивающих соответствующее значение целевой функции $\lambda_1^*(1)$.

Вариант 2 базируется на логичных рассуждениях и проведенных выше рекуррентных вычислениях динамического программирования (10) – (19). Он предполагает реализацию определенной последовательности действий, которые в контексте рассматриваемой задачи формулируются и формализуются следующим образом.

1. Процедуру движения начинаем от последнего математического действия (19). Из него выписываем выражение, дающее оптимальное значение показателя интенсивности прибыли $\lambda_1^*(1)$ на шаге $h = 1$.

$$\lambda_1^*(1) = \frac{\Phi_{13}(1) + \lambda_3^*(2) \cdot t_3^*(2)}{t_{13}(1) + t_3^*(2)} = 12,766. \quad (20)$$

Устанавливаем, что оптимальное значение целевой функции на шаге $h = 1$ обеспечивается за счёт работы судна на схеме $l_{13}^*(1)$. На это указывает индексация первых слагаемых, находящихся в числителе и знаменателе формулы (20).

2. На основании (20) определяем оптимальное значение целевой функции на шаге $h = 2$. Оно представлено параметром $\lambda_3^*(2)$, который в числителе формулы (20) занимает позицию первого множителя второго слагаемого.

3. Переходим к определению оптимального значения критерия $\lambda_3^*(2)$ на шаге $h = 2$. Из соотношения (18) выписываем следующее выражение:

$$\lambda_3^*(2) = \frac{\Phi_{32}(2) + \lambda_2^*(3) \cdot t_2^*(3)}{t_{32}(2) + t_2^*(3)} = 12,16. \quad (21)$$

На основании (21) устанавливаем, что на шаге $h = 2$ в состав оптимального маршрута g_{onm} входит схема $l_{32}^*(2)$.

4. Переходим к первому множителю второго слагаемого выражения (21) и уточняем схему движения, входящую в состав оптимального маршрута на шаге $h = 3$. Значение параметра $\lambda_2^*(3)$ определяем исходя из записи (14).

$$\lambda_2^*(3) = \frac{\Phi_{21}(3) + \lambda_1^*(4) \cdot t_1^*(4)}{t_{21}(3) + t_1^*(4)} = 11,11. \quad (22)$$

На основании полученного соотношения (22) устанавливаем, что на шаге $h = 3$ в структуру оптимального маршрута входит схема $l_{21}^*(3)$.

5. Порядок получения величины $\lambda_1^*(4)$ рассматриваем на основании выражения (10).

$$\lambda_1^*(4) = \lambda_{12}(4). \quad (23)$$

Из (23) определяем, что на шаге $h = 4$ в маршрут g_{onm} входит схема $l_{12}^*(4)$.

В результате проведенной процедуры устанавливаем:

- оптимальный маршрут $g_{onm} \in G$ работы судна состоит из следующей последовательности схем движения: $l_{13}(1) \rightarrow l_{32}(2) \rightarrow l_{21}(3) \rightarrow l_{12}(4)$;
- интенсивность прибыли составляет $12,766 \cdot 10^3$ \$ в сутки;
- продолжительность работы судна

$$T^* = 10 + 10 + 11 + 16 = 47 \text{ суток};$$

- прибыль $\Phi^* = 12,766 \cdot 47 = 600,002 \cdot 10^3 \$$.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие **выводы**:

1. Теория и практика организации перевозок и управления работой флота показывает, что ключевое значение для обеспечения эффективного функционирования судоходных компаний имеет обоснование оптимальных маршрутов работы судов, входящих в их состав.

2. В результате анализа различных источников установлено, что большинство имеющихся теоретических и прикладных исследований в области решения задач маршрутизации ориентированы, как правило, на действующую в момент их подготовки административно-распределительную систему управления. Приведенные в рассмотренных работах имитационные модели, эвристические алгоритмы и экономико-математические модели линейного программирования, являются статическими и не учитывают временной аспект работы судна, динамику постоянно изменяющихся условий внешней среды и уровень достоверности исходной информации. Классические методы динамического программирования, используемые в работах [9, 10], позволяют принимать решения, главным образом, на основании результатов поиска экстремумов функций аддитивных показателей.

3. В ходе проведенного исследования разработаны и сформулированы теоретические и методические положения по обоснованию маршрута работы судна с учётом динамики развития процесса перевозки. Они объединяют достоинства эвристического подхода и вычислительные алгоритмы динамического программирования, а также устраняют вышеперечисленные недостатки, а именно:

- реализация предложенной модели (2)-(6) задачи динамического программирования позволяет принимать решения при различном уровне достоверности исходной информации, исходя из пространственно-временной дислокации транспортного средства и с учётом параметров работы судна в ретроспективном периоде;

- предложенная методика проведения рекуррентных вычислений при решении задачи позволяет устанавливать в качестве критерия оптимальности не только аддитивные показатели, но и показатели не являющиеся таковыми. Это, в свою очередь, даёт возможность при обосновании управленческих решений руководствоваться не только соответствующими финансовыми результатами работы судна, но и показателями времени, за которое обеспечивается их получение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакаев В.Г. Эксплуатация морского флота. – М.: Транспорт, 1965. – 560 с.
2. Капитанов В.П. Имитационная модель движения судов на линии // Экономика и эксплуатация морского транспорта: Сб. науч. тр. ОИИМФ. – М., 1978. – Вып. 14. – С 40-42.
3. Геронимус Б.Л., Житков В.А., Розе В. А. Математические методы в принятии решений на транспорте: эволюция методологии // Экономика и математические методы. Т. 20. – 1984. – Вып. 2. – С. 223-231.
4. Громовой Э.П. Математические методы и модели в планировании и управлении на морском транспорте. – М.: Транспорт, 1979. – 360 с.
5. Экономико-математическое моделирование деятельности флота и портов / А.А. Бакаев, В.С. Михалевич, В.Л. Ревенко и др. – М.: Транспорт, 1986. – 287 с.
6. Экономико-математические методы и модели в управлении морским транспортом / Е.Н. Воевудский, Н.А. Коневцева, Г.С. Махуренко, И.П. Тарасова / Под ред. Е.Н. Воевудского. – М.: Транспорт, 1988. – 384 с.
7. Яценко В.А. Решение задачи о назначении тоннажа в порты погрузки при оперативном регулировании // Методы и средства управления морским флотом. – 1973. – Вып. 172. – С. 31-39.
8. Межуев О.И., Васкинен Л.А. Алгоритм составления маршрутов движения судов // Методы и средства управления морским флотом. – 1972. – Вып. 158. – С. 61-66.
9. Шibaев А.Г. Подготовка и обоснование решений по управлению перевозками и работой флота морской судоходной компании: Монография. – Одесса: ХОРС, 1998. – 208 с.
10. Кириллова Е.В. Организация и управление работой судов в ролкерной транспортно-технологической системе: Дис. канд. техн. наук: 05.22.01. – Одесса, 2005. – 229 с.
11. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.
12. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965. – 458 с.

Надійшла 18.05.06

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ

В статье сделан анализ влияния выбора напряжений на точность определения параметров кривой усталости. Показано, что за счёт использования опытной информации, полученной при повторных испытаниях не разрушившихся образцов, можно повысить надёжность этих параметров оценки.

Ключевые слова: кривая усталости, предел выносливости, параметры уравнения кривой усталости, ступенчатое нагружение, повторное нагружение.

Экспериментальную зависимость числа циклов до разрушения от величины напряжения при испытаниях на сопротивление усталости представляют различными математическими моделями. Чаще всего для стальных объектов применяют степенное и показательное уравнения, для объектов из лёгких сплавов и сплавов на основе меди – уравнение Вейбулла. Представим каждое из этих уравнений в форме трёхпараметрических математических моделей.

$$\sigma/k + \lg N = \sigma_R/k + \lg N_{G_1} = C_{\Pi} \text{ или} \quad (1)$$

$$(\sigma - \sigma_R)/k + \lg N = \lg N_{G_1};$$

$$m \lg \sigma + \lg N = m \lg \sigma_R + \lg N_{G_2} = C_c, \text{ или} \quad (2)$$

$$m(\lg \sigma - \lg \sigma_R) + \lg N = \lg N_{G_2};$$

$$m_w \lg(\sigma - \sigma_R) + \lg N = C_w, \quad (3)$$

где σ и N – напряжение и число циклов до разрушения соответственно;

σ_R – предел выносливости;

$k, m, m_w, C_{\Pi}, C_c, C_w$ – параметры (первые три параметра являются угловыми, а три последующие – представляют собой абсциссы точек пересечения наклонных участков кривых усталости, линеаризованных в соответствующих системах координат).

Точность определения параметров уравнений (1)-(3) зависит от объёма выборки. При этом соответствующее этой точности необходимое количество объектов (натурных деталей, моделей, образцов), испытанных на каждом из уровней напряжений, в предположении их нормальности

распределения, определяется по формуле [1]

$$n = \frac{\gamma^2}{\Delta_N^2} z_{1-N/2}^2 \text{ или } n = \frac{z_{1-N/2}^2}{\delta_N^2}, \quad (4)$$

где γ – коэффициент вариации долговечности до разрушения;

Δ_N – максимальная относительная ошибка (допуск) при оценке среднего значения в долях среднего значения долговечности до разрушения; $z_{1-\alpha/2}$ – квантиль уровня $P = 1 - N/2$ нормированной нормально распределённой случайной величины; $P = 1 - N/2$ – статистическая надёжность (вероятность непревышения фактической ошибкой при оценке среднего значения характеристики максимальных ошибок Δ_N или δ_N по модулю); δ_N – максимальная относительная ошибка при оценке среднего значения в долях среднего квадратического отклонения долговечности до разрушения.

Генеральный коэффициент вариации γ , как правило, неизвестен, поэтому чаще используют выборочный коэффициент вариации v , известный по результатам испытаний аналогичных объектов. В случае, если таких данных нет, то коэффициент вариации уточняется в процессе эксперимента и необходимый объём эксперимента определяют по формуле [1]

$$n = \frac{v^2}{\Delta_N^2} t_{\alpha,\beta}^2, \quad (5)$$

где $t_{\alpha,\beta}$ – значение квантили статистики t уровня $P = 1 - N/2$ для числа степеней свободы $\beta = n - 1$. Величиной α обычно задаются ($\alpha = 0,1$ или $\alpha = 0,05$, реже $\alpha = 0,01$).

Поскольку уравнения кривых усталости (1)-(3) являются приближёнными математическими моделями, то значения их параметров будут зависеть не только от объёма выборки и рассеяния свойств объектов, как это следует из формул (4) и (5), но также от их расположения. Другими словами эти параметры будут зависеть от субъективного выбора уровня напряжений. Кроме того, всегда при построении кривых усталости приходится часть этой кривой (от нижнего уровня напряжения до предела выносливости) достраивать путём экстраполяции. Рассмотрим конкретный пример. Пусть кривая усталости задана параметрами уравнения Вейбулла: $\sigma_R = 200$ МПа; $m_w = 1$; $C_w = 7,0$. Задаваясь значениями напряжений, определим соответствующую долговечность до разрушения по кривой усталости, описанной этим уравнением. Разность между ступенями напряжений во всех случаях примем постоянной, равной 20 МПа, а первое из спектра напряжений – на 5, 10, 15 и 20 МПа

выше предела выносливости. По этим данным определим параметры степенного уравнения кривой усталости (уравнение 2). Результаты расчёта величин, необходимых для определения параметров 4 кривых усталости методом наименьших квадратов (каждая кривая соответствует своему начальному напряжению, превышающему предел выносливости на 20, 15, 10 и 5 МПа), приведены в таблице 1.

Таблица 1

| σ , МПа | N, Цикл. | $x_i = \lg \sigma$ | $y_i = \lg N$ | $\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma}$ | $(\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma}) \cdot \lg N_i$ | $(\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma})^2$ |
|-------------------------|----------|--------------------|---------------|-----------------------------------|---|---------------------------------------|
| Первая кривая | | | | | | |
| 220 | 500000 | 2,342 | 5,699 | -0,070 | -0,3989 | 0,0049 |
| 240 | 250000 | 2,380 | 5,398 | -0,032 | -0,1727 | 0,0010 |
| 260 | 166667 | 2,415 | 5,222 | 0,003 | 0,0157 | 0,000009 |
| 280 | 125000 | 2,447 | 5,097 | 0,035 | 0,1784 | 0,0012 |
| 300 | 100000 | 2,477 | 5,000 | 0,065 | 0,3250 | 0,0042 |
| Σ | | | | 0,001 | -0,0525 | 0,0113 |
| Вторая кривая | | | | | | |
| 215 | 666667 | 2,332 | 5,824 | -0,072 | -0,4193 | 0,0052 |
| 235 | 285714 | 2,371 | 5,456 | -0,033 | -0,1800 | 0,0011 |
| 255 | 181818 | 2,407 | 5,260 | 0,003 | 0,0158 | 0,000009 |
| 275 | 133333 | 2,439 | 5,125 | 0,035 | 0,1794 | 0,0012 |
| 295 | 105263 | 2,470 | 5,022 | 0,066 | 0,3315 | 0,0044 |
| Σ | | | | 0,001 | -0,0726 | 0,0119 |
| Третья кривая | | | | | | |
| 210 | 1000000 | 2,322 | 6,000 | -0,073 | -0,438 | 0,0053 |
| 230 | 333333 | 2,362 | 5,523 | -0,033 | -0,182 | 0,0011 |
| 250 | 200000 | 2,398 | 5,301 | 0,003 | 0,016 | 0,000009 |
| 270 | 142857 | 2,431 | 5,155 | 0,036 | 0,186 | 0,0013 |
| 290 | 111111 | 2,462 | 5,046 | 0,067 | 0,338 | 0,0045 |
| Σ | | | | 0 | -0,080 | 0,0122 |
| Четвёртая кривая | | | | | | |
| 205 | 2000000 | 2,312 | 6,301 | -0,074 | -0,466 | 0,0055 |
| 225 | 400000 | 2,352 | 5,602 | -0,034 | -0,190 | 0,0012 |
| 245 | 222222 | 2,389 | 5,347 | 0,003 | 0,016 | 0,000009 |
| 265 | 153846 | 2,423 | 5,187 | 0,037 | 0,192 | 0,0014 |
| 285 | 117647 | 2,455 | 5,071 | 0,069 | 0,350 | 0,0048 |
| Σ | | | | 0,001 | -0,098 | 0,0129 |

Уравнение эмпирической линии регрессии запишем в виде

$$Y = \bar{y} + b(x - \bar{x}) \text{ или } \lg N = \lg \bar{N} + b(\lg \sigma - \lg \bar{\sigma}).$$

Введя обозначения $m = -b$ и $C_c = \lg \bar{N} + m \lg \bar{\sigma}$, получим записанное выше уравнение (2), т.е.

$$\lg N + m \lg \sigma = C_c \dots \quad (6)$$

Расчёт параметров m и C_c в соответствии с методом наименьших квадратов и сами уравнения кривых усталости с найденными параметрами приведены ниже.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n = \frac{2,342 + 2,380 + 2,415 + 2,447 + 2,477}{5} = 2,412;$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n = \frac{5,699 + 5,398 + 5,222 + 5,097 + 5,000}{5} = 5,283;$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{-0,0525}{0,0113} = -4,6460.$$

$$4,646 \cdot \lg \sigma + \lg N = 16,489 \quad (7)$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n = \frac{2,332 + 2,371 + 2,407 + 2,439 + 2,470}{5} = 2,404;$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n = \frac{5,824 + 5,456 + 5,260 + 5,125 + 5,022}{5} = 5,337;$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{-0,0726}{0,0119} = -6,1008.$$

$$6,1 \cdot \lg \sigma + \lg N = 20,003 \quad (8)$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n = \frac{2,322 + 2,362 + 2,398 + 2,431 + 2,462}{5} = 2,395$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n = \frac{6,000 + 5,523 + 5,301 + 5,155 + 5,046}{5} = 5,405$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{-0,080}{0,0122} = -6,5574$$

$$6,557 \cdot \lg \sigma + \lg N = 21,109 \quad (9)$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n = \frac{2,312 + 2,352 + 2,389 + 2,423 + 2,455}{5} = 2,386$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n = \frac{6,301 + 5,602 + 5,347 + 5,187 + 5,071}{5} = 5,502$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{-0,098}{0,0129} = -7,597$$

$$7,597 \cdot \lg \sigma + \lg N = 23,631 \quad (10)$$

Управление проектами и задачи оптимизации

Как видно из расчёта, параметры степенного уравнения m и C_c существенно изменяются в зависимости от выбора уровней напряжений (параметр m изменяется в пределах 4,646-7,597; а параметр C_c – 16,489-23,631).

Проведем аналогичные расчёты для показательного уравнения кривой усталости (уравнение 1). По тем же данным определим параметры этого уравнения. Результаты для расчёта параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2

| σ, МПа | N, Цикл. | $y_i = \lg N$ | $\sigma_i - \bar{\sigma}$ | $(\sigma_i - \bar{\sigma}) \cdot \lg N_i$ | $(\sigma_i - \bar{\sigma})^2$ |
|-------------------------|-------------|---------------|---------------------------|---|-------------------------------|
| Первая кривая | | | | | |
| 220 | 500000 | 5,699 | -40 | -227,96 | 1600 |
| 240 | 250000 | 5,398 | -20 | -107,96 | 400 |
| 260 | 166667 | 5,222 | 0 | 0,00 | 0 |
| 280 | 125000 | 5,097 | 20 | 101,94 | 400 |
| 300 | 100000 | 5,000 | 40 | 200,00 | 1600 |
| Σ | | | 0 | -33,98 | 4000 |
| Вторая кривая | | | | | |
| 215 | 666667 | 5,824 | -40 | -232,96 | 1600 |
| 235 | 285714 | 5,456 | -20 | -109,12 | 400 |
| 255 | 181818 | 5,260 | 0 | 0,00 | 0 |
| 275 | 133333 | 5,125 | 20 | 102,44 | 400 |
| 295 | 105263 | 5,022 | 40 | 200,88 | 1600 |
| Σ | | | 0 | -38,76 | 4000 |
| Третья кривая | | | | | |
| 210 | 1000000 | 6,000 | -40 | -240,00 | 1600 |
| 230 | 333333 | 5,523 | -20 | -110,46 | 400 |
| 250 | 200000 | 5,301 | 0 | 0 | 0 |
| 270 | 142857 | 5,155 | 20 | 103,10 | 400 |
| 290 | 111111 | 5,046 | 40 | 201,84 | 1600 |
| Σ | | | 0 | -45,52 | 4000 |
| Четвёртая кривая | | | | | |
| 205 | 2000000 | 6,301 | -40 | -252,04 | 1600 |
| 225 | 400000 | 5,602 | -20 | -112,04 | 400 |
| 245 | 222222 | 5,347 | 0 | 0 | 0 |
| 265 | 153846 | 5,187 | 20 | 103,74 | 400 |
| 285 | 117647 | 5,071 | 40 | 202,84 | 1600 |
| Σ | | | 0 | -57,2 | 4000 |

Уравнение эмпирической линии регрессии в этом случае запишем в виде

$$Y = \bar{y} + b(x - \bar{x}) \text{ или } \lg N = \lg \bar{N} + b(\sigma - \bar{\sigma}).$$

Введя обозначения $k = -\frac{1}{b}$ и $C_n = \lg \bar{N} + \frac{\bar{\sigma}}{k}$, получим уравнение (2) в такой форме:

$$\lg N + \frac{\sigma}{k} = C_n. \quad (11)$$

Ниже приведен расчёт параметров k и C_n в соответствии с методом наименьших квадратов и сами уравнения кривых усталости с найденными параметрами

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \sum_{i=1}^n x_i / n = \frac{220 + 240 + 260 + 280 + 300}{5} = 260 \text{ МПа}; \\ b &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{-33,98}{4000} = -0,0085; \\ \lg N + \frac{\sigma}{117,7} &= 7,749. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \sum_{i=1}^n x_i / n = \frac{215 + 235 + 255 + 275 + 295}{5} = 255 \text{ МПа}; \\ b &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{-38,76}{4000} = -0,0097; \\ \lg N + \frac{\sigma}{103,1} &= 7,811. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \sum_{i=1}^n x_i / n = \frac{210 + 230 + 250 + 270 + 290}{5} = 250 \text{ МПа}; \\ b &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{-45,52}{4000} = -0,01138 \\ \lg N + \frac{\sigma}{87,9} &= 8,250 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n = \frac{205 + 225 + 245 + 265 + 285}{5} = 245 \text{ МПа};$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{-57,20}{4000} = -0,0143;$$

$$\lg N + \frac{\sigma}{69,9} = 9,005. \tag{15}$$

Как следует из приведенного расчёта, параметры показательного уравнения k и C_n как и параметры степенного уравнения, значительно изменяются в зависимости от выбора уровней напряжений (параметр k изменяется в пределах 69,9 МПа-117,7 МПа; а параметр C_n – 7,749-9,005).

Как указывалось выше, неустойчивость значений параметров приведенных выше уравнений кривых усталости в основном связана с необходимостью экстраполяции наклонного участка кривой усталости до пересечения с горизонтальным её участком и с недостаточным объёмом выборки. Исключить или, по крайней мере, существенно уменьшить влияние данных факторов можно путём использования дополнительных экспериментальных результатов.

Для решения этой задачи обратимся к методике испытаний образцов в соответствии с которой строят наклонный и горизонтальный участки кривой усталости и рассмотрим конкретный пример.

Ниже, на рисунке приведена схема испытаний 30 гладких образцов из стали 45 по методу ступенчатого изменения нагрузки «вверх – вниз» и таблица 3 с результатами испытаний этих образцов при напряжениях, превышающих предел выносливости [2]. Данная схема позволяет определить математическое ожидание предела выносливости.

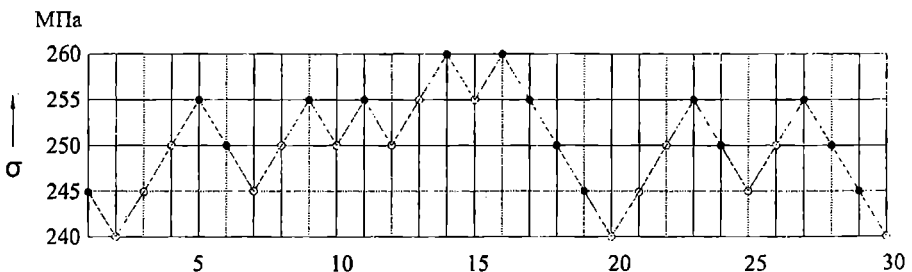


Рис. Схема испытаний по методу ступенчатого изменения загрузки «вверх-вниз»

Чёрные точки соответствуют случаю, когда образец разрушился, а очерченные контуром – случаю когда образец не разрушился.

Таблица 3

| № п/п | σ | N | $\lg \sigma$ | $\lg N$ |
|-------|----------|--------|--------------|---------|
| 1 | 300 | 72200 | 2,477 | 4,859 |
| 2 | 300 | 86200 | 2,477 | 4,936 |
| 3 | 300 | 98300 | 2,477 | 4,993 |
| 4 | 300 | 113300 | 2,477 | 5,054 |
| 5 | 300 | 199200 | 2,477 | 5,299 |
| 6 | 285 | 206800 | 2,455 | 5,316 |
| 7 | 285 | 206800 | 2,455 | 5,316 |
| 8 | 285 | 299100 | 2,455 | 5,476 |
| 9 | 285 | 308900 | 2,455 | 5,490 |
| 10 | 285 | 394400 | 2,455 | 5,596 |
| 11 | 270 | 336600 | 2,431 | 5,527 |
| 12 | 270 | 362400 | 2,431 | 5,559 |
| 13 | 270 | 547100 | 2,431 | 5,738 |
| 14 | 270 | 602600 | 2,431 | 5,780 |
| 15 | 270 | 703600 | 2,431 | 5,847 |

Для этого следует использовать метод максимального правдоподобия. Математическое ожидание предела выносливости согласно этому методу находим из условия [1]

$$\sum_{i=-\infty}^{+\infty} n_i \cdot \left[\frac{\varphi(z_{i-1})}{q_{i-1}} - \frac{\varphi(z_i)}{P_i} \right] = 0, \quad (16)$$

где n_i – количество образцов, разрушившихся (не разрушившихся) на i -м уровне напряжения; z_i – нормированная нормально распределённая величина; $P_i = 1 - q_i$ – вероятность разрушения на i -м уровне; $\varphi(z)$ – плотность вероятности нормированного нормального распределения.

Решение уравнения (16) достаточно сложное, поэтому чаще при расчётах используют линейную аппроксимацию, приводящую к такому выражению [1]:

$$\bar{\sigma}_R = \sigma_0 + d \cdot \left(\frac{\sum_{i=0}^{\kappa} in_i}{N} \pm 0,5 \right), \quad (17)$$

где σ_0 – самый минимальный из уровней напряжения; κ – количество уровней напряжений; i – порядковый номер уровня напряжений; d – разность между ближайшими уровнями напряжений. Знак плюс ставится

в случае, когда число разрушений превышает число неразрушений (расчёт ведут по неразрушенным объектам), а знак минус – когда общее число разрушений меньше числа неразрушений (расчёт ведут по разрушенным объектам).

В результате обработки данных, приведенных на схеме и в таблице 3, получены следующие значения параметров уравнений (1)-(3): $\bar{\sigma}_R = 250$ МПа; $k = 36,30$; $C_{II} = 13,24$; $m = 18,10$; $C_C = 49,81$; $m_w = 2,11$; $C_w = 8,59$.

Для получения дополнительной опытной информации обратимся к приведенной выше схеме испытаний по методу «вверх-вниз». Образцы, которые не разрушились при базовом числе циклов ($N=10^7$), подвергнем повторным испытаниям, причём уровень напряжений будем увеличивать ступенчато до тех пор, пока они не разрушатся. Проведение повторных испытаний теоретически обосновано тем, что накопление усталостных повреждений происходит только при нагрузках, превышающих предел выносливости. Результаты этих дополнительных испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5

| Номер образца | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 | 10 | 12 | 13 | 15 | 20 | 21 | 22 | 25 | 26 | 30 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| σ , МПа | 245 | 250 | 255 | 250 | 255 | 255 | 255 | 260 | 260 | 245 | 255 | 250 | 250 | 255 | 245 |
| N , тыс. цикл. | 3672 | 1615 | 1420 | 1337 | 1125 | 1097 | 1348 | 982 | 1004 | 2897 | 1206 | 1457 | 1848 | 1556 | 2980 |

Таким образом, получена возможность строить наклонный участок кривой усталости с учётом дополнительных данных (напряжений и долговечностей всех образцов, испытанных по методу ступенчатого нагружения). При использовании этих данных, получены следующие значения параметров уравнений (1)-(3): $k = 36,58$; $C_{II} = 13,14$; $m = 17,16$; $C_C = 47,46$; $m_w = 1,31$; $C_w = 7,31$.

Полученные результаты показывают, что использование дополнительной опытной информации, а также замена экстраполяции экспериментальных данных более предпочтительной интерполяцией, даёт возможность более надёжно определять параметры наклонного участка кривой усталости, в особенности, как видно из сравнения параметров, это касается уравнения Вейбулла.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение. – 1985. – 232 с.*
2. *Олейник Н.В., Коноплёв А.В., Рибakov А.Г. Методы ускоренного определения характеристик сопротивления усталости в практических приложениях: Монография. – Одесса: Астропринт, 2000. – 140 с.*

Надійшла 16.05.06

ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ТАБЛИЦ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА И ЕГО ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Данные о теплофизических свойствах воздуха и его компонентов необходимы для развития ряда отраслей техники. По мере накопления соответствующих экспериментальных данных многие авторы на их основе составляли таблицы свойств и диаграммы состояния. В статье рассмотрены основные этапы разработки справочных данных о теплофизических свойствах воздуха и его компонентов и наиболее известные таблицы свойств, охватывающие широкую область параметров.

***Ключевые слова:** воздух, азот, кислород, аргон, теплофизические свойства.*

Проблема обеспечения науки и техники данными о свойствах веществ в широких интервалах изменения температуры и давления весьма актуальна. В настоящее время не менее 50 % от общего объёма необходимой информации о свойствах веществ и материалов составляет информация о теплофизических свойствах газов, жидкостей и их смесей.

Данные о теплофизических свойствах воздуха и его основных компонентов – азота, кислорода и аргона – необходимы не только для проектирования воздухоразделительных установок, но и в целом для развития криогенной и космической техники, химической и газовой промышленности, энергетики и ряда других отраслей техники. Этим обусловлен интерес, проявляемый учеными и специалистами к данным о свойствах указанных веществ.

***Цель настоящей статьи** – отражение основных этапов разработки справочных данных о теплофизических свойствах воздуха и его компонентов и краткое описание наиболее известных таблиц свойств этих веществ, охватывающих широкую область параметров состояния.*

До анализа справочных данных о свойствах воздуха и его компонентов следует отметить, что разные категории данных оказывают различное влияние на точность инженерных расчетов. Влияние точности данных о теплофизических свойствах на результаты расчетов процессов, протекающих в криогенных установках, иллюстрирует табл. 1, составленная американскими авторами [1].

Экспериментальные исследования термодинамических свойств воздуха и его компонентов начаты ещё в конце XIX века, а вязкости и

теплопроводности – в начале прошлого века. Процесс накопления и обобщения данных о свойствах газов можно разделить на три этапа. На первом этапе (вторая половина XIX в. – первая четверть XX в.) в основном накапливались экспериментальные термические данные. На втором (примерно 1925-1965 гг.) были получены более надёжные опытные данные о всех теплофизических свойствах, что позволило составить таблицы свойств и диаграммы состояния для ряда веществ. Третий этап, продолжающийся и сейчас, связан с разработкой уточнённых таблиц и с появлением автоматизированных систем для расчета свойств.

Таблица 1

*Влияние точности данных о теплофизических свойствах
на результаты расчетов криогенных процессов*

| Наименования процессов | Наименования свойств | | | | |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | р, v, T- данные | фазовое равновесие | калорич. свойства | критич. параметры | свойства переноса |
| Ректификация | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Сжатие и расширение | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| Теплообмен | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Измерение количества | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Хранение | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Техника безопасности | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 |

Влияние: 1 – весьма значительное; 2 – значительное; 3 – менее значительное.

Научные представления о термодинамическом поведении веществ были созданы ещё в XIX веке. Важным событием было сжижение кислорода, осуществлённое в 1877 г. Большинство опытных данных, полученных до 1925 г., охватывало узкие области параметров. Однако Амага ещё в 1880–1893 гг. измерил сжимаемость воздуха, его компонентов и некоторых других газов до давления 3000 атм. Эти эксперименты получили высокую оценку ученых, и Амага был избран членом Французской академии наук.

В 1920-х годах начато составление таблиц термодинамических свойств и построение диаграмм состояния наиболее важных для техники газов, в том числе воздуха и его компонентов. Первые таблицы и диаграммы чаще всего составлялись графо-аналитической обработкой опытных данных. Начиная с 1950-х годов, для расчета таблиц стали использовать уравнения состояния.

Перечень наиболее известных таблиц теплофизических свойств для воздуха и его компонентов, предложенных на втором этапе разработки справочных данных, приведен в табл. 2. Там указаны интервалы температур и давлений, охваченных таблицами, и наименования приведенных свойств и диаграмм, прилагавшихся ко многим таблицам. В табл. 2 упомянуты также построенные И.П. Ишкиным и М.Г. Каганером [3] и В.И. Елифановой и соавторами [9] диаграммы состояния для воздуха и его компонентов. К сожалению, точность этих диаграмм невысока в связи с недостаточной надёжностью исходных данных.

Таблица 2

Наиболее известные таблицы теплофизических свойств и диаграммы состояния, составленные в 1955-1968 г.

| Год | Авторы и источники | Вещества | Интервалы парам. | | Приведенные свойства | Диаграммы |
|------|----------------------------|---|-------------------------|------------------------|---|---------------------------|
| | | | ΔT , К | Δp , МПа | | |
| 1955 | Хильзенрат и соавторы [2] | N ₂ O ₂ Ar Air | 100... 3000 | 0,001...10 | Z, ρ, h, s, c _p , c _f /c _v , w, η _T , λ _T , Pr _T | — |
| 1956 | Ишкин и Каганер [3] | N ₂ Air | 75...300 | 0,05...5 0,05...20 | — | T, s; h, s; Z, p; Z, T |
| 1956 | Дин [4] | Air Ar | 70...450 80...600 | 0,1...122 0,1...507 | v, h, s, c _v , c _p — » — | T, s T, s |
| 1961 | Дин [4] | N ₂ | 80...700 | 0,1...1013 | — » — | T, s |
| 1961 | Баер и Швиер [5] | Air | 63... 1523 | 0,05...456 | — » — | T, s; h, s |
| 1962 | Стробридж [6] | N ₂ | 64...300 | 0,01...20 | ρ, h, u, s | |
| 1963 | Стюарт и соавторы [7] | O ₂ | 55...300 | 0,01...30 | — » — | |
| 1964 | Госман и соавторы [8] | Ar | 86...700 | 0,01...101 | — » — | |
| 1964 | Елифанова и соавторы [9] | N ₂ O ₂ Ar Air | T _{тр} ...320 | 0,02...50 | — | T, s |
| 1966 | Вассерман и соавторы [10] | N ₂ O ₂ Ar Air | T _{тр} ...1300 | 0,025...100 | v, h, s, c _p , η, λ | T, s; h, s |
| 1968 | Вассерман и Рабинович [11] | N ₂ O ₂ Ar Air | T _{тр} ...180 | 0,1...50 | ρ, v, h, s, c _p , β _T , η, λ | ρ, T; h, p; s, p |
| 1968 | Бестужев [12] | N ₂ O ₂ Air | 1000... 6000 | 0,01...100 | v, h, s, c _p , k, w, η, λ | h, s |

Из зарубежных таблиц этого периода таблицы Хильзенрата и соавторов [2] для четырёх рассматриваемых веществ, рассчитанные по уравнению состояния, охватывают весьма широкий интервал температур,

но сравнительно узкий диапазон давлений. Таблицы Дина для воздуха, аргона и азота [4], полученные графо-аналитической обработкой опытных данных, ввиду несовершенства этого метода и ограниченности использованных опытных данных при низких температурах неточны: погрешность значений удельного объёма достигает 2 %. Данным Баера и Швиера для воздуха [5], рассчитанным с помощью двух уравнений состояния, при температурах ниже -150°C и выше 200°C также свойственны погрешности, достигающие 1 % по удельному объёму.

В отчетах Национального бюро стандартов США приведены таблицы термодинамических свойств азота [6], кислорода [7] и аргона [8], рассчитанные по модифицированному уравнению состояния Бенедикта, Вебба, Рубина.

В период до 1965 г. получены также опытные данные о вязкости и теплопроводности воздуха и его компонентов в широкой области параметров. Эти данные обобщены в монографиях И.Ф. Голубева [13], Н.В. Цедерберга [14] и в справочнике Н.Б. Варгафтика [15].

В середине XX века стало очевидным, что рациональный способ составления таблиц термодинамических свойств – их расчет по уравнению состояния, полученному на основании p, v, T -данных. Эффективно решить такую задачу позволили работы профессора Я.З. Казавчинского [16], который предложил форму уравнения состояния реального газа, основанную на изучении конфигурации термодинамической поверхности. Это позволило ещё до широкого внедрения ЭВМ в практику исследований аппроксимировать опытные p, v, T -данные с высокой точностью и, как следствие, обеспечить точность рассчитываемых значений калорических свойств. В 1955-1965 г. Я.З. Казавчинский и его сотрудники в Одесском институте инженеров морского флота составили уравнения состояния и таблицы свойств около 30 газов.

Результаты проведенных в ОИИМФ исследований теплофизических свойств газообразного воздуха и его компонентов обобщены в монографии А.А. Вассермана, Я.З. Казавчинского и В.А. Рабиновича [10] – одной из первых отечественных монографий, посвященных свойствам реальных газов. В ней выполнен анализ данных о свойствах азота, кислорода, аргона и воздуха, приведены уравнения состояния этих газов, уравнения для расчета вязкости и теплопроводности и подробные таблицы свойств. Продолжением этих работ стало аналогичное обобщение данных о свойствах жидкого воздуха и его компонентов в монографии А.А. Вассермана и В.А. Рабиновича [11]. Таблицы, приведенные в упомянутых монографиях, в течение многих лет использовались специалистами по криогенной технике и химической технологии. Обе монографии в 1970 г. переведены на английский язык и изданы по заказу национального научного фонда США.

Особую группу составили не указанные в табл. 2 работы, посвященные расчету свойств воздуха при высоких температурах в идеально-газовом приближении, но с учетом диссоциации и ионизации

его компонентов. Например, А.С. Предводителей и сотрудники [17] опубликовали таблицы термодинамических свойств воздуха при температурах до 20000 К и давлениях до 1000 атм. Гурвич и соавторы [18] рассчитали свойства многих веществ в идеально-газовом состоянии при температурах до 6000 К. Аналогичные работы появились за рубежом, что было обусловлено потребностями космической техники. В конце рассматриваемого этапа работ А.С. Бестужев [12] определил теплофизические свойства диссоциированных азота, кислорода и воздуха при температурах 1000÷6000 К и давлениях 0,1÷1000 бар как реальных газов.

В этот же период Щербань и соавторы [19] составили таблицы свойств и диаграммы состояния влажного воздуха для области параметров $-30\div+60^{\circ}\text{C}$, 500÷1000 мм рт. ст., необходимые для расчетов процессов его осушения.

Дальнейшему развитию исследований свойств веществ способствовал разработанный в 1963 г. Международным союзом по теоретической и прикладной химии (IUPAC) проект создания международных таблиц термодинамических свойств газов и жидкостей. В связи с этим Научный совет АН СССР по проблеме «Высокотемпературная теплофизика» в 1964 г. организовал комиссию по теплофизическим таблицам. Вскоре Госстандарт СССР организовал Государственную службу стандартных справочных данных (ГСССД). Это обеспечило аттестацию данных и издание таблиц стандартных справочных данных (ССД), утверждаемых Госстандартом.

В 1971 г. составлены международные таблицы термодинамических свойств аргона [20] на основе советского и американского проектов. Однако в дальнейшем Проектный центр IUPAC (Лондон) представлял комиссии АН СССР проекты таблиц, оговаривая весьма краткие сроки для согласования, что затрудняло участие советских ученых в такой работе. Поэтому комиссия сосредоточила внимание на создании общесоюзных таблиц свойств веществ.

В 1960-х годах наступил третий этап разработки справочных данных о свойствах веществ с широким использованием ЭВМ. Благодаря применению ЭВМ Стробридж, Бендер, Стюарт и Джекобсен модифицировали известное уравнение состояния Бенедикта-Вебба-Рубина, увеличив число коэффициентов и повысив тем самым его точность. В 1962-1980 гг. они составили новые уравнения состояния для компонентов воздуха в указанной форме.

Отечественные исследователи также стали использовать ЭВМ для составления уравнений состояния. Развивая это направление, А.А. Вассерман [21] разработал методику составления единого уравнения состояния для газа и жидкости, надёжно описывающего опытные данные о термических и калорических свойствах и удовлетворяющего фундаментальным условиям равновесия фаз. Г.А. Спиридонов, А.Д. Козлов и В.В. Сычев [22] предложили метод расчета таблиц термодинамических свойств с помощью системы уравнений,

эквивалентных по точности описания опытных данных. Метод позволил оценивать погрешности рассчитываемых значений свойств.

Одновременно развивались экспериментальные исследования теплофизических свойств газов и жидкостей. В 1965-1976 гг. рядом авторов опубликованы p, v, T -данные для азота, кислорода и аргона до давлений 2200, 1013 и 1667 МПа соответственно. Была измерена плотность воздуха в интервалах 288...873 и 78...199 К до давлений 72 и 59 МПа. Появились новые данные об изохорной теплоёмкости азота и аргона и о скорости звука в этих веществах. Определены также вязкость и теплопроводность воздуха и его компонентов в широкой области параметров (до 1200 К и 440 МПа).

Расширение области параметров, изученной экспериментально, и наличие эффективных расчетных методов позволили комиссии АН СССР и Государственной службе ССД выдвинуть задачу уточнения таблиц термодинамических свойств газов. Эту работу выполнил коллектив московских и одесских ученых, подготовивший серию монографий ГСССД. Они содержат описание новых расчетных методов и новые таблицы свойств одноатомных газов [23], азота [24], кислорода [27], воздуха [25], а также метана, этана, этилена и пропана при температурах от кривой насыщения до 1500 К до давления 100 МПа. Перечень основных таблиц термодинамических свойств воздуха и его компонентов, составленных на третьем этапе разработки справочных данных, приведен в табл. 3. В монографии [23] имеются также данные о свойствах одноатомных веществ в кристаллическом состоянии. Упомянутая серия монографий в 1987 г. переведена на английский язык и выпущена в свет издательством Hemisphere (Нью Йорк).

Авторы монографий ГСССД сопоставили рассчитанные значения свойств с опытными данными и оценили возможные погрешности этих значений. На основе трёх монографий разработаны таблицы стандартных справочных данных о плотности, энтальпии, энтропии и изобарной теплоёмкости азота, воздуха и кислорода в жидком и газообразном состояниях при давлениях $0,1 \div 100$ МПа и температурах $70 \div 1500$ К (для кислорода – до 1000 К). Средние квадратические случайные погрешности значений свойств, представленных в таблицах, в основном лежат в пределах $0,02 \div 0,25$ % для плотности и энтропии, $0,2 \div 1,6$ кДж/кг для энтальпии и $0,1 \div 3$ % для изобарной теплоёмкости, возрастающей при повышении давления и уменьшении температуры.

Позднее составлены новые уравнения для расчета динамической вязкости и теплопроводности этих веществ, описывающие большинство опытных данных со средними квадратическими отклонениями $0,5 \div 3$ %. По уравнениям рассчитаны таблицы ССД для широкой области параметров [28, 29, 31]. Данные о теплопроводности многих газов и жидкостей, в том числе воздуха и его компонентов, в интервале от нормальной температуры кипения до $1000 \div 1500$ К (для азота до 2500 К)

при давлениях до 100÷200 МПа представлены в трёх монографиях Н.Б. Варгафтика и соавторов [39-41].

Таблица 3

Основные таблицы теплофизических свойств,
составленные в 1971-2000 гг.

| Год | Авторы и источники | Вещества | Интервалы парам. | | Приведенные свойства |
|------|--------------------------|---|--|--|--|
| | | | $\Delta T, K$ | $\Delta p, MPa$ | |
| 1971 | Ангус и соавторы [20] | Ar | 84...1100 | 0,1...100 | v, h, s, c_p |
| 1976 | Рабинович и соавт.[23] | Ar | 84...1300 | 0,1...100 | $\bar{v}, h, s, c_p, \eta, \lambda$ |
| 1977 | Сычев и соавторы [24] | N ₂ | 65...1500 | 0,1...100 | $\rho, Z, h, s, c_v, c_p,$ w, α_h, k, f |
| 1978 | Сычев и соавторы [25] | Air | 70...1500 | 0,1...100 | — » — |
| 1979 | Ангус и соавторы [26] | N ₂ | 63...1100 | 0,02...100 | $\bar{v}, Z, h, u, s, w,$ $c_v, c_p, c_p/c_v, f, \alpha_h$ |
| 1981 | Сычев и соавторы [27] | O ₂ | 55...1500 | 0,1...100 | $\rho, Z, h, s, c_v, c_p,$ w, α_h, k, f |
| 1986 | Козлов и соавторы [28] | N ₂ | 65...1000 | 0,1...200 | η, λ |
| 1986 | Козлов и соавторы [29] | O ₂ | 70...500 | 0,1...100 | η, λ |
| 1987 | Вагнер и де Реук [30] | O ₂ | 54...300 | 0,02...80 | $\bar{v}, Z, h, u, s, w,$ $c_v, c_p, c_p/c_v, f, \alpha_h$ |
| 1988 | Козлов и соавторы [31] | Air | 150...1000 | 0,1...100 | η, λ |
| 1989 | Зубарев и соавт. [32] | N ₂ O ₂ Ar Air | 500... 2500 | 0,1...300 | $\rho, Z, h, s, c_v, c_p,$ $w, \alpha_h, k, f, \eta, \lambda, Pr$ |
| 1990 | Недоступ и соавторы [33] | N ₂ O ₂ Ar | 1000... 20000 | 100... 40000 | ρ, h, s, F, c_v, c_p |
| 1991 | Стюарт и соавторы [34] | O ₂ | 54...300 | 0,02...80 | $\rho, u, h, s, c_v, c_p, w$ |
| 1995 | Рабинович и Бекетов [35] | N ₂ O ₂ Ar Air | 200...400 | 0,1...10 | $\phi, \mu, v, h, s, c_p,$ p_m, d |
| 1997 | Джекобсен и соавторы [1] | N ₂ O ₂ Ar Air | 63...2000 54...300 84...1200 60...850 | 0,1...1000 0,1...50 0,1...1000 0,1...50 | $\rho, u, h, s, c_v, c_p, w$ и диаграммы h, T и T, s |
| 1999 | Тегелер и соавт. [36] | Ar | 84...700 | 0,1...1000 | $\rho, u, h, s, c_v, c_p, w$ |
| 2000 | Шпан и соавторы [37] | N ₂ | 63...1000 | 0,1...1000 | — » — |
| 2000 | Леммон и соавт. [38] | Air | 60...2000 | 0,1...2000 | — » — |

Упомянутые монографии и таблицы стандартных справочных данных явились составной частью комплексной системы 40 оперативного обеспечения народного хозяйства нормативно-справочными данными о

свойствах технически важных газов и жидкостей. За разработку системы ряд ведущих теплофизиков, включая многих авторов этих монографий и таблиц, в 1987 г. удостоен Премии Совета Министров СССР.

Вскоре В.Н. Зубарев и соавторы [32] разработали метод составления теоретически обоснованного уравнения состояния и уравнений для свойств переноса, опираясь на потенциал Леннард-Джонса (12-6) и определяя его параметры с помощью ЭВМ по опытным данным. В монографии [32] приведены таблицы свойств 12 газов в широкой области параметров.

В.И. Недоступ, Е.П. Галькевич и Е.С.Каминский [33] с помощью разработанного ими метода идеальных кривых составили уравнения состояния для группы технически важных газов, включающей азот, кислород и аргон. Эти уравнения благодаря рациональной форме позволяют проводить экстраполяцию в область параметров, не исследованную экспериментально. По уравнениям рассчитаны значения свойств до весьма высоких температур и давлений. Данные этих авторов полезны для решения геофизических и астрофизических проблем и изучения ударно-волновых процессов.

Следует упомянуть также монографию В.А. Рабиновича и В.Г. Бекетова [35], посвященную свойствам влажных газов при повышенных давлениях с учетом реальности свойств компонентов и смеси. В монографии имеются таблицы свойств влажного аргона, азота, кислорода и воздуха.

После издания монографий ГСССД и таблиц ССД за рубежом появились новые опытные данные, уравнения состояния и таблицы свойств воздуха и его компонентов. Эти уравнения, названные фундаментальными, представляют свободную энергию Гельмгольца как функцию плотности и температуры. Достоинства такой формы уравнения – возможность расчета всех термодинамических свойств путём дифференцирования свободной энергии и более высокая точность описания свойств в критической области.

Активно работали в указанном направлении Стюарт и Джекобсен в университете штата Айдахо (США) и Вагнер в Рурском университете (Германия). Результаты их исследований использованы при подготовке международных таблиц термодинамических свойств азота и кислорода [26, 30]. Несмотря на издание монографий [26, 30] эти ученые продолжили составление уточнённых уравнений состояния и таблиц. Поэтому далее рассмотрены только новейшие таблицы свойств воздуха и его компонентов.

В монографии Джекобсена и соавторов [1], подводящей итог многолетним исследованиям Стюарта, Джекобсена и их сотрудников, приведены таблицы свойств 15 криогенных веществ. Свойства азота, аргона и воздуха рассчитаны по уравнениям состояния, опубликованным этими авторами в 1986-1992 гг., а свойства кислорода – по уравнению

Шмидта и Вагнера [42]. Для каждого вещества построены диаграммы h, p и T, s , причем максимальная температура для диаграмм T, s равна 300 К.

Уравнение Шмидта и Вагнера использовано также в работе Стюарта, Джекобсена и Вагнера [34], где рассчитаны таблицы свойств кислорода до давления 80 МПа. Позднее Тегелер, Шпан и Вагнер [36] предложили уравнение состояния, с помощью которого рассчитали свойства аргона от кривой плавления до 700 К и 1000 МПа. Шпан и соавторы [37] составили уравнение состояния азота, действующее от температуры тройной точки до 1000 К при давлении до 2200 МПа. По уравнению рассчитаны таблицы свойств для указанного интервала температуры до 1000 МПа.

Леммон и соавторы [38] составили новое уравнение состояния для воздуха и рассчитали его термодинамические свойства в интервале температур 60...2000 К до 2000 МПа. Для обеспечения надёжности рассчитанных значений свойств в таком широком диапазоне параметров авторы использовали при составлении уравнения состояния, помимо экспериментальных данных, опорные p, ρ, T -данные для области высоких температур и давлений. Эти данные были получены на основании опытных данных для азота и закона соответственных состояний.

Высокая точность новых уравнений и таблиц подтверждена подробным сопоставлением с опытными данными. Погрешности большинства рассчитанных значений свойств лежат в пределах $0,02 \div 0,1$ % для плотности и $0,1 \div 2$ % для теплоёмкостей c_v и c_p .

Таким образом, в результате усилий многих ученых, проводивших экспериментальные и расчетно-теоретические исследования теплофизических свойств воздуха и его компонентов, свойства этих важных для техники веществ изучены и описаны аналитически в широкой области параметров. Новые уравнения состояния и уравнения для расчета вязкости и теплопроводности описывают опытные данные с точностью, соответствующей точности эксперимента. Составленные с помощью этих уравнений таблицы свойств обеспечивают надёжность результатов научных и инженерных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jacobsen R.T., Penoncello S.G., Lemmon E.W. Thermodynamic Properties of Cryogenic Fluids. – Kluwer Academic Publ., 1997. – 312 p.*
2. *Tables of Thermal Properties of Gases/J. Hilsenrath, C.W. Beckett, W.C. Benedict and oth. NBS Circ. 564, 1955. – 473 p.*
3. *Ишукин И.П., Казанер М.Г. Исследование термодинамических свойств воздуха и азота при низких температурах под давлением // Журн. технической физики. – 1956. – Т.26. – №10. – С. 2329-2347.*

4. Din F. *Thermodynamic Functions of Gases*. London: Butterworths. V.2. – 1956. – 201 p.; V.3. – 1961. – 161 p.
5. Baehr H.D., Schwier K. *Die thermodynamischen Eigenschaften der Luft im Temperaturbereich zwischen – 210 °C und +1250 °C bis zu Drucken von 4500 bar*. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag, 1961. – 136 S.
6. Stobridge T.R. *The Thermodynamic Properties of Nitrogen from 64 to 300° K between 0,1 and 200 Atmospheres* // *Nat. Bur. Standards Tech. Note 129*, 1962. – 108 p.
7. Stewart R.B., Hust J.G., McCarty R.D. *Interior Thermodynamic Properties for Gaseous and Liquid Oxygen at Temperatures from 55 to 300 K and Pressures to 300 Atm.* // *NBS Report 7922*. – 1963. – 99 p.
8. Gosman A.L., Hust J.G., McCarty R.D. *Interior Thermodynamic Properties of Liquid and Gaseous Argon from 86 to 300 K with Pressures to 1000 Atmospheres* // *NBS Report 8293*. – 1964. – 119 p.
9. *Разделение воздуха методом глубокого охлаждения, Т.1 / В.И. Елифанова, Л.С. Аксельрод, А.И. Мороз и др.* – М.: Машиностроение, 1964. – 479 с.
10. Вассерман А.А., Казавчинский Я.З., Рабинович В.А. *Теплофизические свойства воздуха и его компонентов*. – М.: Наука, 1966. – 375 с.
11. Вассерман А.А., Рабинович В.А. *Теплофизические свойства жидкого воздуха и его компонентов*. – М.: Изд-во стандартов, 1968. – 239 с.
12. Бестужев А.С. *Термодинамические и транспортные свойства воздуха и его компонентов при высоких температурах*. Автореф. канд. дисс. – Одесса: ОТИ им. М.В. Ломоносова, 1968. – 32 с.
13. Голубев И.Ф. *Вязкость газов и газовых смесей*. – М.: Физматгиз, 1959. – 375 с.
14. Цедерберг Н.В. *Теплопроводность газов и жидкостей*. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
15. Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. – М.: Физматгиз, 1963. – 708 с.
16. Казавчинский Я.З. *Об одном методе определения постоянной вириальной формы уравнения состояния реального газа* // *Докл. АН СССР*. – 1954. – Т.95. – № 5. – С. 1005-1008.
17. *Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 12000 до 20000 °K и давлений от 0,001 до 1000 атм) / А.С. Предводителев, Е.В. Ступоченко, А.С. Плешанов и др.* – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 230 с.

18. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Л.В. Гурвич, Г.Ф. Хачкурузов, В.А. Медведев и др.; Под ред. В.П. Глушко, Т.1-II. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 1162 с., 916 с.
19. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Титова Н.М. Свойства влажного воздуха при давлениях 500÷1000 мм рт. ст. (Таблицы и диаграммы). – М.: Госгортехиздат, 1960. – 184 с.
20. *International Thermodynamic Tables of the Fluid State. Argon, 1971/ Edited by Angus S., Armstrong B. from tables, prepared by Gosman A.L., McCarty R.D., Hust J.G., Vasserman A.A., Rabinovich V.A.* – London: Butterworths, 1972. – 102 p.
21. Вассерман А.А. О составлении единого уравнения состояния для газа и жидкости с помощью ЭВМ// В сб. ГСССД «Теплофизические свойства веществ и материалов». – М.: Изд-во стандартов, 1976. – Вып. 10. – С. 7-34.
22. Спиридонов Г.А., Козлов А.Д., Сычев В.В. Определение термодинамических функций газов по данным p, v, T -измерений методом математического эксперимента на ЭВМ// В сб. ГСССД «Теплофизические свойства веществ и материалов». – М.: Изд-во стандартов, 1976. – Вып. 10. – С. 35-53.
23. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона/ В.А. Рабинович, А.А. Вассерман, В.И. Недоступ, Л.С. Векслер; Под ред. В.А. Рабиновича. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 636 с.
24. Термодинамические свойства азота / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 352 с.
25. Термодинамические свойства воздуха / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 276 с.
26. *International Thermodynamic Tables of the Fluid State. Volume 6: Nitrogen/ Angus S., de Reuck K.M., Armstrong R.T., Jacobsen R.T., Stewart R.B.* – Oxford: Pergamon, 1979. – 136 p.
27. Термодинамические свойства кислорода / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 304 с.
28. ГСССД 89-85. Азот. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 65...1000 К и давлениях от состояния разреженного газа до 200 МПа / А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов, Ю.В. Мамонов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 21 с.

29. ГСССД 93-86. Кислород. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 70...500 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 100 МПа / А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов, Ю.В. Мамонов и др – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.
30. Wagner W. de Reuck K.M. Oxygen. International Thermodynamic Tables of the Fluid State-9; based on surveys and equations by W. Wagner, R. Schmidt, J. Ewers, R.B. Stewart, R.T. Jacobsen. – Oxford: Blackwell Scient. Publ., 1987. – 114 p.
31. ГСССД 109-87. Воздух сухой. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 150...1000 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 100 МПа / А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов, Ю.В. Мамонов. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.
32. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник / В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
33. Недоступ В.И., Галькевич Е.П., Каминский Е.С, Термодинамические свойства газов при высоких температурах и давлениях. – К.: Наукова думка, 1990. – 196 с.
34. Stewart R.B., Jacobsen R.T., Wagner W. Thermodynamic Properties of Oxygen from the Triple Point to 300 with Pressures to 80 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1991. – V.20. – No. 5. – P. 917-948.
35. Rabinovich V.A., Beketov V.G. Moist Gases: Thermodynamic Properties. – NY: Begell House Inc, 1995. – 294 p.
36. Tegeler Ch., Span R., Wagner W. A New Equation of state for Argon Covering the Fluid Region for Temperatures From the Melting Line to 700 K at Pressures up to 1000 Mpa // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1999. – V.28. – No.3. – P. 779-850.
37. Span R., Lemmon E.W., Jacobsen R.T., Wagner W., Jokozeki A. A Reference Equation of State for the Thermodynamic Properties of Nitrogen for Temperatures from 63,151 to 1000 K and Pressures to 2200 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2000. – V.29. – No.6. – P. 1361-1433.
38. Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen From 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa / E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, S.G. Penoncello, D.G. Friend // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2000. – V.29. – No.3. – P. 331-385.
39. Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Юрчак Р.П. Теплопроводность газов и жидкостей: Справочные данные. – М.: Изд-во стандартов, 1970. – 155 с.

40. Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. Теплопроводность жидкостей и газов: Справочные данные. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 472 с.
41. Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности газов и жидкостей. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
42. Schmidt R., Wagner. W. A new Form of Equation of State for Pure Substances and its Application to Oxygen // Fluid Phase Equilibria. – 1985. – V. 19. – No. 1. – P. 175-200.

Надійшла 31.08.06

УТОЧНЕНИЕ ФОРМУЛЫ СРЕДНЕЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗОВ В РАСЧЕТЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Средняя теплоемкость газов, входящая в расчет изменения внутренней энергии в рабочем процессе дизеля, описывается обычно как функция температуры. В статье уточнена формула для теплоемкости с учетом существенно изменяющегося за время рабочего цикла давления газов в цилиндре.

Ключевые слова: рабочий процесс, внутренняя энергия газов, изохорная теплоемкость воздуха, плотность воздуха, уравнение состояния.

Основой расчета рабочего процесса дизеля с учетом динамики тепловыделения является первый закон термодинамики. Уравнение этого закона, записанное в конечных разностях, имеет вид

$$\Delta Q_x = \Delta U + \Delta L + \Delta Q_w,$$

где ΔQ_x – количество теплоты, подведенное за расчетный интервал $\Delta \varphi$;

ΔL – работа газов в цилиндре;

ΔQ_w – потеря теплоты в стенки цилиндра;

ΔU – изменение внутренней энергии газов;

В работах [1, 2] изохорная теплоемкость газов и, следовательно, изменение внутренней энергии ΔU рассматриваются как функции температуры. В то же время в монографии В.В. Сычева, А.А. Вассермана и соавторов [3] и в разработанных на ее базе стандартных справочных данных [4] рассмотрены термодинамические свойства воздуха как реального газа. Поэтому можно уточнить имеющуюся зависимость изохорной теплоемкости $C_v'(T) = 19,26 + 0,0026T$ с учетом существенного изменения давления в цилиндре во время рабочего цикла. Уточненная зависимость $C_v' = f(T, P)$, отличается от предложенной в [1, 2], что позволит скорректировать расчет рабочего процесса с учетом динамики тепловыделения в целом. В результате в уравнение для расчета C_v' и в конечном итоге в выражение для ΔU введена новая переменная P и уточнено само выражение $C_v' = f(T)$.

В основу расчета термодинамических свойств воздуха положено его уравнение состояния, представляющее коэффициент сжимаемости Z как функцию приведенных температуры и плотности в виде

$$Z = \frac{P}{\rho^* R^* T} = 1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{Si} b_{ij} \omega^i / \tau^j . \quad (1)$$

Здесь $\omega = \rho / \rho_{KP}$, $\tau = T / T_{KP}$, где ρ, T – плотность и температура воздуха;

$\rho_{KP} = 316,5 \text{ кг/м}^3$, $T_{KP} = 132,5 \text{ К}$ – критические значения плотности и температуры воздуха;

На уравнении (1) базируется следующее выражение для расчета изохорной теплоемкости [3]

$$Cv / R = Cv_0 / R + A_5, \text{ или } Cv = Cv_0 + A_5 * R, \quad (2)$$

где Cv_0 – изохорная теплоемкость в идеально-газовом состоянии;

$R = 287,1 \text{ Дж/кг}^{\circ}\text{К}$ – газовая постоянная;

$A_5 = - \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{Si} \frac{j(j-1)}{i} b_{ij} \omega^i / \tau^j$ – комплекс, вычисляемый с помощью

уравнения состояния воздуха по заданным значениям коэффициентов b_{ij} [3, с.44];

S_i : array[1...8] of integer = (7,7,6,6,5,4,4,3) – массив индексов j ;

$r = 8$.

Изохорная теплоемкость в идеально-газовом состоянии Cv_0 рассчитывается на основании изобарной теплоемкости по известной зависимости

$$Cv_0 = Cp_0 - R, \\ Cp_0 / R = \sum_{j=0}^6 \alpha_j \tau^j + \sum_{j=1}^6 \beta_j \tau^{-j},$$

где α, β – массивы постоянных коэффициентов [3, С.37],

$$\tau = T / 100.$$

В приведенном выше выражении $Cv(T, P)$ (2) от температуры и давления зависит плотность воздуха $\rho = f(T, P)$, которую можно определить из усредненного термического уравнения состояния (1). Это уравнение является нелинейным, поскольку $\omega = f(\rho)$, и не может быть решено в аналитической форме относительно ρ . Для определения вещественных корней уравнения ρ численным методом запишем его в следующем виде:

$$P - \rho^* R^* T^* \left[1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{Si} b_{ij} \omega^i / \tau^j \right] = 0$$

и окончательно, для определения корня, в относительном к давлению виде

$$\frac{\rho^* R^* T}{P} * \left[1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{S_i} b_{ij} \omega^i / \tau^j \right] - 1 = 0. \quad (3)$$

Поскольку заранее известно, что корень уравнения вещественный и единственный на заданном интервале, воспользуемся простым и эффективным методом «половинного деления» [4, 5].

В таблицах термодинамических свойств воздуха [3, С. 31] и на диаграммах $\rho = f(P)$ [3, С. 95] приведены значения плотности в диапазоне температур до 1500К. Для расчета рабочего процесса актуален диапазон температур: 300К ... 2000К, давлений: 0 ... 20 МПа. На рис. 1 приведены диаграммы, а в таблице 1 – значения плотности воздуха для этих диапазонов.

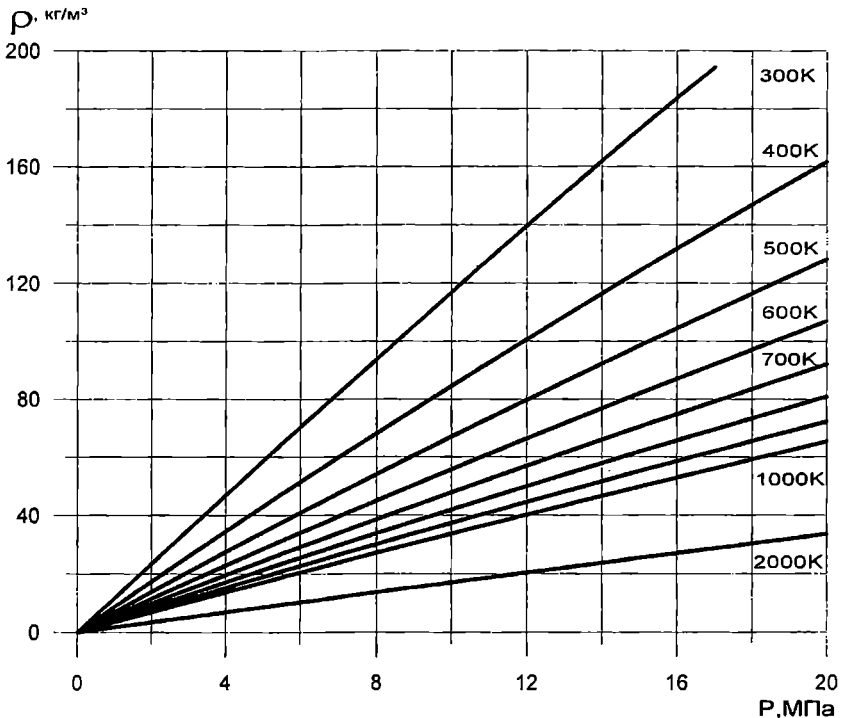


Рис. 1. Зависимость плотности воздуха ρ [кг/м³] от давления и температуры в диапазоне $P \leq 20$ МПа и $T = 300...2000$ К

Необходимо отметить, что в диапазоне 1500 К ... 2000 К происходит экстраполяция данных с помощью уравнения состояния. Из рис. 1. видно, что в рассматриваемой области параметров зависимость плотности от давления близка к линейной.

Значения плотность $\rho = f(T, P)$ с зоной экстраполяции 1600 К÷2000 К.

Таблица 1

| P, Мпа | 300К | 500К | 1000К | 1500К | 1600К | 1700К | 1800К | 1900К | 2000К |
|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,0 | 11,64 | 6,94 | 3,47 | 2,32 | 2,17 | 2,02 | 1,93 | 1,83 | 1,74 |
| 2,0 | 23,34 | 13,84 | 6,92 | 4,62 | 4,31 | 4,08 | 3,83 | 3,63 | 3,47 |
| 3,0 | 35,08 | 20,68 | 10,35 | 6,92 | 6,49 | 6,16 | 5,77 | 5,47 | 5,2 |
| 4,0 | 46,83 | 27,47 | 13,75 | 9,2 | 8,63 | 8,15 | 7,68 | 7,28 | 6,91 |
| 5,0 | 58,59 | 34,2 | 17,14 | 11,47 | 10,76 | 10,17 | 9,58 | 9,08 | 8,62 |
| 6,0 | 70,34 | 40,88 | 20,5 | 13,74 | 12,88 | 12,14 | 11,47 | 10,87 | 10,33 |
| 7,0 | 82,06 | 47,51 | 23,84 | 15,99 | 15 | 14,13 | 13,37 | 12,66 | 12,08 |
| 8,0 | 93,73 | 54,08 | 27,16 | 18,23 | 17,11 | 16,11 | 15,33 | 14,49 | 13,73 |
| 9,0 | 105,35 | 60,59 | 30,46 | 20,46 | 18,92 | 18,09 | 17,11 | 16,27 | 15,47 |
| 10,0 | 116,9 | 67,04 | 33,73 | 22,68 | 21,29 | 20,66 | 19,56 | 18,98 | 18,1 |
| 15,0 | 172,93 | 98,41 | 49,8 | 33,62 | 31,38 | 29,77 | 28,16 | 26,71 | 25,41 |
| 20,0 | 224,92 | 128,25 | 65,37 | 44,31 | 41,64 | 39,28 | 37,13 | 35,38 | 33,58 |

Для того, чтобы дать сравнительную характеристику уравнений изохорной теплоемкости воздуха $Cv' = f(T)$ и $Cv' = f(T, P)$ приведем соответствующие диаграммы на рис. 2.

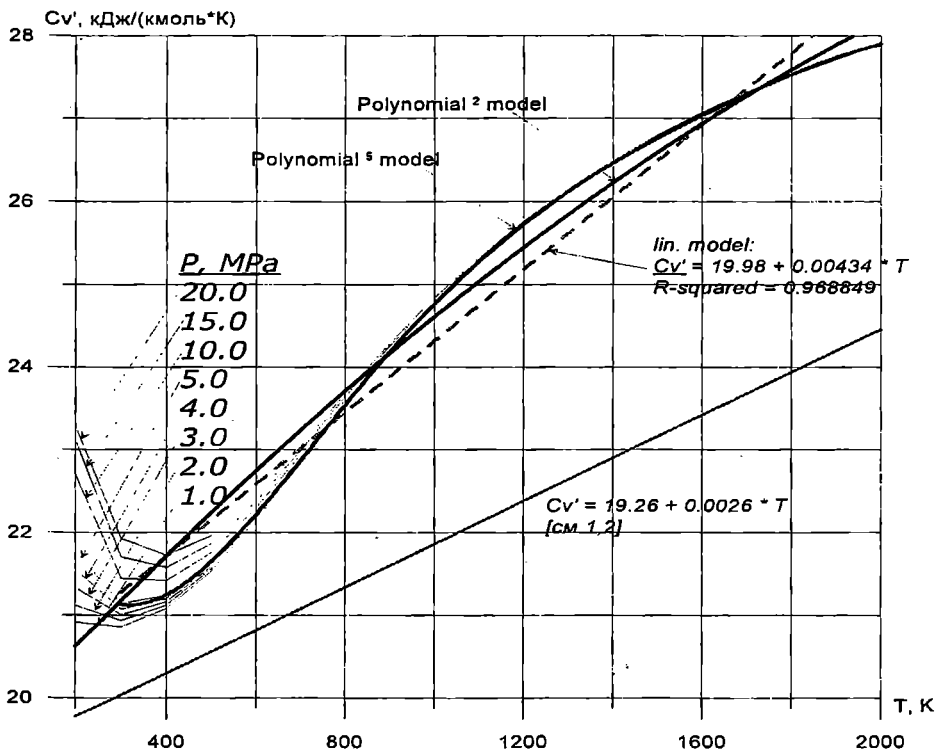


Рис. 2. Сравнение диаграмм $Cv' = f(T)$, приведенной в [1, 2] и $Cv' = f(T, P)$ рассчитанных по методике [3] с линейной и полиномиальной моделями

Значения изохорной теплоемкости воздуха $Cv' = f(T, P)$.

Зона экстраполяции 1600К÷200К

Таблица 2

| T, K | 1.0, МПа | 2.0, Мпа | 3.0, Мпа | 4.0, Мпа | 5.0, Мпа | 10.0, Мпа | 15.0, Мпа | 20.0, Мпа |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 200,К | 20,916 | 21,12 | 21,333 | 21,551 | 21,771 | 22,701 | 23,117 | 23,289 |
| 300,К | 20,863 | 20,937 | 21,008 | 21,076 | 21,143 | 21,446 | 21,705 | 21,928 |
| 400,К | 21,082 | 21,124 | 21,164 | 21,203 | 21,242 | 21,42 | 21,579 | 21,725 |
| 500,К | 21,535 | 21,562 | 21,588 | 21,613 | 21,638 | 21,755 | 21,862 | 21,961 |
| 1000,К | 24,746 | 24,752 | 24,757 | 24,762 | 24,768 | 24,793 | 24,817 | 24,841 |
| 1500,К | 26,766 | 26,768 | 26,77 | 26,772 | 26,774 | 26,783 | 26,792 | 26,801 |
| 1600,К | 27,046 | 27,048 | 27,049 | 27,051 | 27,053 | 27,06 | 27,068 | 27,075 |
| 1700,К | 27,294 | 27,296 | 27,297 | 27,299 | 27,3 | 27,306 | 27,313 | 27,319 |
| 1800,К | 27,513 | 27,514 | 27,515 | 27,517 | 27,518 | 27,523 | 27,529 | 27,534 |
| 1900,К | 27,71 | 27,711 | 27,712 | 27,713 | 27,714 | 27,719 | 27,724 | 27,728 |
| 2000,К | 27,906 | 27,907 | 27,907 | 27,908 | 27,909 | 27,913 | 27,918 | 27,922 |

В таблицах 1, 2 темным цветом выделены температурные зоны, не приведенные в монографии [3] и необходимые для расчета рабочего процесса СДВС с учетом динамики тепловыделения.

На рис. 2 и в таблице 2 значения изохорных теплоемкостей даны в величинах КДж/Кмоль*К. Перевод значений изохорных теплоемкостей из КДж/Кг*К в указанную размерность осуществляется с помощью $\mu = 28,96$ Кг/Кмоль

$$Cv'_{\text{Кмоль}} = Cv'_{\text{Кг}} * \mu.$$

Для зоны высоких температур (выше 800К) учет давления в цилиндре не актуален. С целью получения однопараметрических зависимостей, аналогичных приведенной в [1, 2], были построены полиномиальные модели для частного случая $P=5$ МПа.

$$Cv(T) = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5.$$

Коэффициенты моделей до 5-го порядка включительно и их свойства, приведенные в таблице 3, получены с помощью однопараметрического моделирования в среде Grapher 2.04.

Таблица 3

Коэффициенты моделей $Cv' = f(T)$ и статистика моделирования

| Degree = 1 | Degree = 2 | Degree = 3 | Degree = 4 | Degree = 5 |
|---|--|---|--|--|
| Coefficients: A = 19,98 B = 0,00434 $\Sigma\Delta^2 = 2,93177$ $R^2 = 0,968849$ | Coefficients: A = 18,41 B = 0,0078 C = -1,49422E-006 $\Sigma\Delta^2 = 0,624053$ $R^2 = 0,993369$ | Coefficients: A = 19,50 B = 0,0038 C = 2,41645E-006 D = -1,133528E-009 $\Sigma\Delta^2 = 0,355121$ $R^2 = 0,996227$ | Coefficients: A = 21,93 B = -0,0084 C = 2,20408E-005 D = -1,358485E-008 E = 2,7068088E-012 $\Sigma\Delta^2 = 0,0552309$ $R^2 = 0,9999413$ | Coefficients: A = 24,13 B = -0,0225 C = 5,38052E-005 D = -4,580234E-008 E = 1,7713606E-011 F = -2,60987778E-015 $\Sigma\Delta^2 = 0,00260445$ $R^2 = 0,999972$ |

Выводы.

1. Анализ диаграммы $Cv' = f(T)$, приведенной в [1, 2] и диаграмм $Cv' = f(T, P)$ рассчитанных по методике [3, 6], показывает их значительное отличие во всем температурном диапазоне (от 11,2% при 800К до 14,6% при 1500К).
2. Для процесса сжатия, где различие в методах расчета максимально, процентная погрешность в определении Cv смеси воздуха и продуктов сгорания может быть определена по формуле

$$\Delta C_{см} = 100 * \frac{[\alpha(1 + \gamma_r) - \gamma_r] * [Cv'_{[1,2]} - Cv'_{[3,6]}]}{\gamma_r Cv'' + [\alpha(1 + \gamma_r) - \gamma_r] * Cv'_{[3,6]}}$$

где α – коэффициент избытка воздуха; γ_r – коэффициент остаточных газов; Cv'' – теплоемкость «чистых» продуктов сгорания [1, 2]. В диапазоне температур и давлений процесса сжатия $\Delta C_{см} = 7...10\%$.

3. Анализ погрешности расчета внутренней энергии, из уравнения первого закона термодинамики $\Delta U = U_{jn} - U_j = M_{jn} C_{jn} T_{jn} - M_j C_j T_j$, показывает, что 10% различия в значениях $C_{см}$ приводит к такому же различию в подсчете внутренней энергии ΔU .
4. Анализ влияния давления и температуры на изохорную теплоемкость воздуха в рассматриваемой области параметров показывает существенно большее влияние температуры, чем давления. Например, при 400К Cv' изменяется на 1,6% при изменении давления от 1 до 10МПа. При 5МПа Cv' изменяется на 17% при изменении температуры от 300 до 1000К см. табл. 2.

Лучшее качество моделирования однопараметрической зависимости $Cv' = f(T)$ обеспечивает ортогональный полином 5-й степени, построенный для среднего значения давления газов в цилиндре.

Из рис. 2 видно, что учет давления при расчете изохорной теплоемкости воздуха актуален в зоне низких и средних температур (до 800К). Именно в этом температурном диапазоне, в основном, происходит процесс сжатия в цилиндре. Таким образом, при расчете процесса сжатия необходим переход на более сложную зависимость $Cv' = f(T, P)$, что позволит уточнить расчет цикла перед началом сгорания и получить более корректную модель рабочего процесса в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов В.С. *Современные проблемы теории судовых дизелей (рабочий процесс и теплопередача): Тексты лекций.* – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1991. – 112 с.
2. Фомин Ю.Я. и др. *Судовые двигатели внутреннего сгорания.* – Л.: Судостроение, 1989. – 344 с.
3. *Термодинамические свойства воздуха* / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 276 с.
4. Отнес Р., Эноксон Л. *Прикладной анализ временных рядов.* – М.: Мир, 1982. – 482 с.
5. Химмельблау Д. *Прикладное нелинейное программирование.* – М.: Мир, 1975. – 534 с.
6. ГСССД 8-79 *Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного воздуха при температурах 75 – 1500 К и давлениях 0.1 – 100 МПа.* М.: Изд-во стандартов, 1980. – 11 с.

УДК 629.12(075.8)

В.В. Вычужанин
В.Х. Кириллов

МНОГОСВЯЗНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНДИЦИОНИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ СУДНА

Приведены результаты разработки непрерывной и дискретной моделей кондиционируемого помещения судна, как многосвязного объекта управления.

Ключевые слова: передаточная функция, преобразование Лапласа, матричное звено.

Наиболее полно (в соответствии с санитарными нормами и правилами) микроклимат воздушной среды в помещении оценивается совокупностью параметров: температурой (T_y); радиационной температурой (T_p); скоростью воздуха (ω_y); относительной влажностью (ϕ_y) [1]. Перечисленные нормируемые параметры являются комплексными оценками их суммарного влияния на организм человека и представляют собой интегральную оценку микроклимата воздушной среды, называемую результирующей температурой (РТ).

Ранее проведенными исследованиями [2] было установлено, что динамическая модель кондиционируемого помещения судна как объекта системы автоматического управления (САУ) по РТ описывается совокупностью линейных дифференциальных уравнений в приращениях параметров, имеющих следующий вид:

$$\Delta T_{\text{опр.н}}(P) = W_{01} \left\{ \left[W_{011}(P) \Delta T_n(P) + W_{012}(P) \Delta q_n(P) + W_{013}(P) \Delta T_y(P) \right] \right\};$$

$$\Delta T_{\text{опр.в}}(P) = W_{02} \left\{ \left[W_{021}(P) \Delta T_k(P) + W_{022}(P) \Delta T_y(P) \right] \right\};$$

$$\begin{aligned} \Delta T_y(P) = & W_{T1}(P) \{ \Delta T_n(P) - [W_{T2}(P) + W_{T3}(P) - W_{T4}(P) \mu W_{T5}(P)] \Delta T_y(P) + \\ & + [W_{T6}(P) + W_{T7}(P)] \Delta q_n(P) + W_{T8}(P) \Delta T_n(P) + W_{T9}(P) \Delta q_{\text{ял}}(P) + \\ & + W_{T10}(P) \Delta N_{\text{осв}}(P) + W_{T11}(P) \Delta Q_{\text{обор}}(P) + W_{T12}(P) \Delta g_{\text{л}}(P) + W_{T13}(P) \Delta \phi_y(P) - \\ & - W_{T14}(P) \Delta \phi_k(P) \pm W_{T15}(P) \Delta T_k(P) - W_{T16}(P) \Delta G_n(P) + W_{T17}(P) \Delta T_{\text{опр.н}}(P) + \\ & + W_{T18}(P) \Delta T_{\text{опр.в}}(P) \}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta \phi_y(P) = W_{B1}(P) [\Delta \phi_n W_{B2}(P) + \Delta g_{\text{л}}(P) W_{B3}(P) + \Delta G_n(P) W_{B4}(P) \mu \Delta \phi_k(P) W_{B5}(P) \pm \pm \Delta \phi_y(P) W_{B6}(P) - \Delta T_y(P) W_{B7}(P)]$$

где $\Delta T_H(P)$, $\Delta T_{\Pi}(P)$, $\Delta T_K(P)$ – приращения температуры наружного, приточного воздуха и воздуха в коридоре;

$\Delta T_{ОГР.Н}(P)$, $\Delta T_{ОГР.В}(P)$ – приращения температуры в ограждающих поверхностях со стороны борта и со стороны переборок;

$\Delta \varphi_{\Pi}(P)$, $\Delta \varphi_K(P)$ – приращения относительной влажности приточного воздуха и воздуха в коридоре;

$\Delta q_H(P)$ – приращения напряжения солнечной радиации;

$\Delta q_{ял}(P)$, $\Delta q_{л}(P)$ – приращения удельных тепловыделений и влаговыделений одним человеком;

$\Delta N_{ОСВ}(P)$, $\Delta Q_{ОБОР}(P)$ – приращения теплопритоков от освещения и оборудования;

$\Delta G_{\Pi}(P)$ – приращение расхода приточного воздуха;

$W(P)$ – непрерывные передаточные функции звеньев прямых каналов и перекрестных связей управляемых и наблюдаемых частей объекта, параметры которых приведены в [2].

При построении модели помещения использовался математический язык классической теории линейных систем, а именно, аппарат передаточных функций и аппарат преобразования Лапласа. Следует отметить, что описание динамических свойств объектов в передаточных функциях определяет лишь так называемые управляемую и наблюдаемую части объекта, причем выходными и входными координатами объекта являются конкретные физические величины.

Структурная схема динамической модели кондиционируемого помещения судна, как многосвязного объекта регулирования по РТ, соответствующая схеме уравнений (1), приведена на рис. 1.

В соответствии с описанием динамической модели помещения (1) его выходными переменными являются четыре параметра: $T_{ОГР.Н}(P)$; $T_{ОГР.В}(P)$; $T_V(P)$; $\varphi_V(P)$. Входными параметрами являются: $\Delta T_H(P)$; $\Delta T_K(P)$; $\Delta T_{\Pi}(P)$; $\Delta q_H(P)$; $\Delta q_{ял}(P)$; $\Delta g_{л}(P)$; $\Delta N_{ОСВ}(P)$; $\Delta Q_{ОБОР}(P)$; $\Delta G_{\Pi}(P)$; $\Delta \varphi_K(P)$; $\Delta \varphi_{\Pi}(P)$. Входные и выходные параметры связаны прямыми (сепаратными) каналами передачи возмущающих входных воздействий на выходные параметры модели. Кроме прямых каналов передачи входных воздействий на объект САУ структурная схема модели вследствие ее физических особенностей содержит естественные прямые и обратные перекрестные связи между отдельными каналами объекта. Неучет выявленных перекрестных связей взаимного влияния прямых каналов может значительно ухудшить функционирование САУ таким объектом и даже привести к потере работоспособности схемы управления. Как следует из структурной схемы (рис. 1), прямые перекрестные связи осуществляются через передаточные

функции $W_{T6}(P)$, $W_{T7}(P)$, $W_{T8}(P)$, $W_{T15}(P)$, $W_{B3}(P)$, $W_{B4}(P)$, $W_{B5}(P)$. Обратные перекрестные связи осуществляются через передаточные функции $W_{013}(P)$, $W_{022}(P)$, $W_{T13}(P)$, $W_{T17}(P)$, $W_{T18}(P)$, $W_{B7}(P)$.

Следовательно, кондиционируемое помещение как объект САУ по РТ правомерно рассматривать в классе многосвязных систем. Теория подобных, линейных многосвязных систем получила развитие, например, в работах [3, 4, 5]. Однако до настоящего времени данные исследования ограничено использовались при описаниях динамических моделей кондиционируемых помещений.

При исследовании помещения как многосвязного объекта САУ целесообразно переходить от обычной развернутой структурной схемы (рис. 1) к матричной структурной схеме. Матричное звено такой схемы характеризует передачу воздействий в линейной многосвязной динамической системе и отражает зависимость каждого выхода системы от каждого из ее выходов. Модель кондиционируемого помещения судна в матричной форме в общем виде может быть представлена следующим образом:

$$\bar{Y} \cdot A(P) = \bar{X}, \quad (2)$$

где \bar{X} – матрица-столбец совокупности входных величин, обозначенных через x .

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

\bar{Y} – матрица-столбец выходных величин, обозначенных через y .

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $y_1 = \Delta T_{\text{орг.н}}$; $y_2 = \Delta T_{\text{орг.в}}$; $y_3 = \Delta T_y$; $y_4 = \Delta \phi_y$.

$A(P)$ – матричное звено в (2) состоит из элементов, каждый из которых определяется передаточными функциями объекта по каналам его прямых и перекрестных связей, а именно

$$A(P) = \| \| a_{ij} \| \| . \quad (5)$$

Матричное звено описывается системой уравнений (1), разрешенных относительно его выходных координат, так что каждое уравнение устанавливает зависимость одной координаты от входных и перекрестных и воздействий и не содержит иных переменных. Число полученных уравнений равно числу выходных переменных. В результате исходная динамическая модель объекта (1), представляющая линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами, приведенная к системе уравнений, описывающих динамику многосвязного объекта, имеет вид

$$\begin{aligned} y_1 + a_{13}y_3 &= x_1; \\ y_2 + a_{23}y_3 &= x_2; \\ a_{31}y_1 + a_{32}y_2 + a_{33}y_3 + a_{34}y_4 &= x_3; \\ a_{43}y_3 + a_{44}y_4 &= x_4. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом для рассматриваемого объекта САУ матрица $A(P)$ состоит из следующих элементов a_{ij}

$$A(P) = \left\| \left\| \begin{array}{cccc} 1 & 0 & a_{13} & 0 \\ 0 & 1 & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{array} \right\| \right\| , \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} a_{13} &= -W_{01}(P)W_{013}(P); a_{23} = -W_{02}(P)W_{022}(P); \\ a_{31} &= -W_{T1}(P)W_{T17}(P); a_{32} = -W_{T1}(P)W_{T18}(P); \\ a_{33} &= 1 + W_{T1}(P)[W_{T2}(P) + W_{T3}(P) - W_{T4}(P) \mp W_{T5}(P)]; \\ a_{34} &= -W_{T1}(P)W_{T13}(P); a_{43} = W_{B1}(P)W_{B7}(P); a_{44} = 1 \mp W_{B1}(P)W_{B6}(P). \end{aligned} \quad (8)$$

Совокупности входных величин $x_1 \dots x_4$ матрицы \bar{X} определяются по приведенным ниже формулам с учетом возмущающих входных

параметров и соответствующих передаточных функций, действующих на объект управления

$$\begin{aligned}
 x_1 &= W_{01}(P)[W_{011}(P)\Delta T_H(P) + W_{012}(P)\Delta q_H(P)]; \\
 x_2 &= W_{02}(P)W_{021}(P)\Delta T_K(P); \\
 x_3 &= W_{T1}(P)\{\Delta T_{II}(P) + [W_{T6}(P) + W_{T7}(P)]\Delta q_H(P) + W_{T8}(P)\Delta T_H(P) + \\
 &+ W_{T9}(P)\Delta q_{ЯЛ}(P) + W_{T10}(P)\Delta N_{ОСВ}(P) + W_{T11}(P)\Delta Q_{ОБОР}(P) + W_{T12}(P)\Delta q_{Л}(P) - \\
 &- W_{T14}(P)\Delta \varphi_K(P) \pm W_{T15}(P)\Delta T_K(P) - W_{T16}(P)\Delta G_{II}(P)\}; \\
 x_4 &= W_{B1}(P)[W_{B2}(P)\Delta \varphi_{II}(P) + W_{B3}(P)\Delta q_{Л}(P) + W_{B4}(P)\Delta G_{II}(P) \mp W_{B5}(P)\Delta \varphi_K(P)].
 \end{aligned} \tag{9}$$

В соответствии с системой уравнений (6) выходные величины матрицы столбца \bar{Y} определяются так:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= x_1 - a_{13}y_3; \\
 y_2 &= x_2 - a_{23}y_3; \\
 y_3 &= \frac{x_3 - a_{31}x_1 - a_{32}x_2 - \frac{a_{34}}{a_{44}}x_4}{a_{33} - a_{13}a_{31} - a_{23}a_{32} - \frac{a_{34}a_{43}}{a_{44}}}; \\
 y_4 &= \frac{1}{a_{44}}(x_4 - a_{43}y_3).
 \end{aligned} \tag{10}$$

Исходная система линейных дифференциальных уравнений в приращениях (1), а также ее матричная форма (2) содержат непрерывные передаточные функции. Такая многосвязная динамическая модель помещения, в случаях ее применения в дискретных САУ, должна быть соответствующим образом, согласно методам [6, 7], преобразована в дискретную форму. Для этого в предположении, что входные данные и выходные сигналы квантуются синхронно с тактом квантования T_0 , были получены на основе Z-преобразования, соответствующие дискретные передаточные функции $W(Z)$. При этом учитывалось, что непрерывные передаточные функции $W_{01}(P)$, $W_{02}(P)$, $W_{T1}(P)$, $W_{B1}(P)$, как было установлено в [2], представляют собой апериодические звенья первого порядка. Остальные периодические функции модели - это усилительные звенья. С помощью Z-преобразования дискретные передаточные функции апериодических звеньев первого порядка определяются по формуле

$$W(Z) = \frac{b_0}{1 + a_1 Z^{-1}}, \tag{11}$$

где $b_0 = K/T$; $a_1 = -e^{-aT_0}$; $a = 1/T$;

K , T - коэффициент усиления и постоянная времени непрерывной передаточной функции.

Заменой непрерывных передаточных функций в (8) и (9) их дискретной Z-формой легко может быть получена дискретная модель многосвязного динамического объекта САУ. Полученные многосвязные динамические модели кондиционируемого помещения судна в непрерывной и дискретной формах могут быть использованы при разработке САУ соответственно аналогового и цифрового типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНИП 47.029.90. Судовые системы вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Росстандарт. – 1990. – 46 с.
2. Вычужанин В.В. Математическая модель кондиционируемого помещения как объекта САУ по РТ // Вісник ОНМУ, 2006. – № 19. – С. 102-115.
3. Чинаев П.И. Методы анализа и синтеза многомерных автоматических систем. – К.: Техника, 1969. – 486 с.
4. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. – М.: Энергия, 1974. – 386 с.
5. Янушевский Р.Т. Теория линейных оптимальных многосвязных систем управления. – М.: Наука, 1973. – 388 с.
6. Катковник В.Я., Полуэктов Р.А. Многомерные дискретные системы управления. – М.: Наука, 1966. – 465 с.
7. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – 566 с.

Надійшла 24.05.06

УДК 316.614:378.18

Л.В. Кошарская
А.А. Турлак
Т.А. Турлак

АДАПТАЦИЯ СТУДЕНТОВ К ЖИЗНИ В ВУЗЕ

Рассматривается структура и содержание адаптации студентов к требованиям вуза; выявляются и анализируются проблемы привыкания к студенческой жизни.

Ключевые слова: адаптация, мотивационный выбор, саморегулирование поведения, привыкание, социализация.

Проблема адаптации студентов к жизни в вузе всегда вызывала оживленные научные дискуссии. Её успешное решение позволяет повысить учебную активность студентов, их успеваемость и качество знаний, а также сохранить привычку к дисциплине, контролируемому поведению и труду.

Термин «адаптация» (приспособление, прилаживание) из центрального в биологии превратился сегодня в часто используемое общественными и техническими науками понятие. Общая психология под адаптацией понимает процесс и результат приспособления органов и функций живого организма к условиям среды, повышение его устойчивости к неблагоприятным факторам [1]. Социальная психология, трактуя адаптацию, указывает, что соотношение процесса и результата активного приспособления зависит от целей и ценностных ориентаций личности, возможностей их достижения в определенной социальной среде. Важным аспектом адаптации в этом случае является принятие личностью социальной роли, что обуславливает отнесение адаптации к одному из основных социально-психологических механизмов социализации личности [2].

Педагогика видит сущность адаптации в оптимизации взаимоотношений личности и группы, сближении целей их деятельности, усвоении групповых норм и традиций [3]. Социология рассматривает адаптацию как активное освоение личностью или группой новой для неё социальной среды [4]. И, наконец, политология определяет адаптацию как первый этап политической социализации, заключающейся в приспособлении личности к окружающей политической обстановке [5].

Таким образом, социально-гуманитарные науки видят сущность адаптации в приспособлении личности к новым, изменяющимся или изменившимся условиям жизни. Чтобы человек был в состоянии принять на себя и выполнять в обществе определённую роль, он должен предварительно освоить в той или иной мере имеющийся социальный

опыт, приспособиться к существующим условиям своей жизнедеятельности.

По отношению к студентам всё вышеозначенное применимо в полной мере.

Активное приспособление к изменившейся среде с помощью психологических и различных социальных средств приводит к пониманию необходимости изменения отношений с этой средой, формирует новые способы поведения.

Важным фактором в адаптации молодого человека к изменяющимся условиям его жизнедеятельности является мотивация – побуждения, вызывающие активность и направленные на более разностороннее и глубокое познание некоторых областей той деятельности, которой он предполагает заниматься или занимается. Мотивация наиболее ярко реализуется при выборе специальности, когда молодому человеку часто приходится руководствоваться противоположными мотивами: престижность будущей профессии и запросы общества; её оплата и форма обучения в вузе; настоящие родители, советы друзей или собственный интерес; романтика будущей профессии или трезвый расчет и т.п. Наличие Болонского процесса и знание его сущности молодежью/студентами также стимулирует мотивацию и обуславливает необходимость её усиления: общий уровень профессиональных знаний и умение применять их на практике напрямую связан с оплатой выполняемой работы. Кроме этого, мотивационные явления, неоднократно повторяясь, со временем становятся чертами личности: мотив достижения успеха – стремление человека добиваться успеха в различных видах деятельности. Напротив, мотив избегания неудачи представляет относительно устойчивое стремление избегать неудач в ситуациях, связанных с оценкой другими людьми результатов деятельности, что может обуславливать заниженный уровень притязаний и возникновение на этой основе комплекса собственной несостоятельности. Однако следует отметить, что в процессе обучения уже на вторых-третьих курсах наблюдается изменение отношения к избранной специальности: студенты указывают несовпадение ожиданий (ожиданий) и реальных представлений, реальных знаний о том, чем они будут заниматься. Наиболее ярко это проявляется в ходе и после прохождения первых реальных производственных практик. Эксперты отмечают значительное, до сорока процентов, повышение интереса к профессии, вплоть до желания перейти на заочное обучение, чтобы сохранить возможность работать по специальности [8]. Именно поэтому необходимость формирования интереса и усиления мотивации к будущей профессии неоднократно высказывалась в рекомендациях специалистов-практиков по улучшению теоретической, практической и психологической подготовки специалистов [7; 9].

Таким образом, мотивационные явления, доминируя в деятельности человека, имеют решающее значение в его намерениях, учёбе,

профессиональной деятельности, поведении и образе жизни, т.е. адаптации к условиям окружающей среды.

Несмотря на непрерывный характер адаптации, её обычно связывают с периодами кардинальной смены деятельности человека и его социального окружения, выделяя при этом два вида адаптационных процессов. Первый из них связан с резкой сменой социальной среды, когда необходимость адаптации возникает в результате социальных перемещений: например, при поступлении в школу или вуз, территориальных перемещений из деревни в город и т.п. Второй вид – это адаптация к изменившимся социальным условиям существования личности. Следует различать адаптацию и адаптированность. Адаптация – процесс, адаптированность – результат адаптации, характеризующий уровень фактического приспособления человека к жизни, взаимодействия его статуса и удовлетворенности/неудовлетворенности собой в изменившихся условиях жизни [4]. Объективным критерием адаптированности является степень реализации человеком в своём поведении норм и правил жизнедеятельности, принятых в данной социальной группе. Субъективный критерий – положительное отношение к членству в этой группе, к существующим условиям удовлетворения и развития основных социальных потребностей.

Эффективность адаптации зависит в значительной степени от того, насколько адекватно воспринимает человек социальные связи и себя в системе этих связей. Искажённое или недостаточно развитое представление о себе ведёт к нарушениям адаптации, выражающихся в признании собственной несостоятельности, появлению чувства одиночества и заброшенности, в уходе из вуза или переориентации на другую специальность, другое учебное заведение. Крайними нарушениями адаптации к жизни в вузе могут быть невротические и психологические расстройства, употребление алкоголя и наркотиков, вплоть до суицида.

Исследователи выделяют основные формы адаптации студентов к условиям вуза, относя сюда формальную адаптацию, касающуюся приспособления к новому окружению и структуре высшей школы, содержанию обучения и новым обязанностям, это своего рода испытание свободой. Второй формой можно назвать процесс интеграции в группу и студенческое окружение в целом: общение в вузовском коллективе и жизнь в общежитии и, наконец, то, что касается подготовки студентов к новым формам и методам работы в высшей школе, собственно учёба [6].

Особенности адаптации студентов к жизни в вузе фиксируются результатами социологических исследований, проводимых в вузах, в том числе в Витебском государственном технологическом университете, как силами студентов в рамках социологической практики, так и социологическими группами при ректорах. Данные этих исследований, в форме анкетного опроса и/или интервью, оформляются в аналитических записках [7; 8], рекомендации по итогам исследований используются в учебном и воспитательном процессе. И хотя, к сожалению, в ОНМУ такие

исследования не проводятся, экспертные оценки деканата судомеханического факультета [9] и устные опросы преподавателей по данной проблеме позволяют сделать вывод, что полученные данные в общих случаях коррелируют¹. В то же время, при всём пилотажном характере подобных исследований, можно отметить тенденции, общие для всех типов вузов.

Итак, восприятие своего изменившегося статуса: с гордостью говорят о своей принадлежности к студенчеству почти семьдесят процентов опрошенных респондентов ВГТУ, им не всё равно, где они учатся и чем занимаются. Анализ результатов интервью показал, что хотя не все студенты разделяют это мнение, «надо было бы, чтобы при слове «студент» у каждого из нас что-то ёкнуло в груди не только сейчас, но и через несколько лет» [7]. Гордость студентов ОНМУ за свой новый статус проявляется в их добровольном желании иметь и носить форменную одежду данного вуза [9], что соответствует представлениям о классическом университете и студенте его. Форменная одежда не только фиксирует принадлежность человека к тому или иному социальному слою, но и дисциплинирует, побуждая придерживаться и выполнять внутренние требования данной группы. Очевидно, администрации ОНМУ следовало бы серьёзно рассмотреть и решить данную проблему, что существенно повлияло бы на мотивацию выбора специальности и ускорение адаптации студентов к вузу.

Следует заметить, что гордость за себя и свои действия по достижению статуса студента, как и жизненная важность поступления в вуз, отмечаемая всеми опрошенными студентами, способствует ускорению адаптации к жизни в вузе. Время, в течение которого студенты знакомятся со своей группой, оценивается (91% опрошенных) чуть больше недели – знак не только общительности студентов, которым для налаживания новых контактов не требуется затрачивать много сил и времени, но и свидетельство начала непосредственной адаптации к группе. Интересен тот факт, что вуз воспринимается не только как институт профессионального образования, но и как среда общения, которая представляет студентам более широкие возможности саморазвития по сравнению со сверстниками, не обучающимися в высшей школе. По данным украинских исследователей, почти 90 процентов респондентов предпочитают неформальное общение в своём, студенческом кругу [10]. И если в начальный период обучения межличностные отношения студентов квалифицируются ими как слабые и поверхностные, излишние нейтральные [11; 12], то на втором курсе более 70% опрошенных юношей и девушек дружно ответили, что уже нашли друга в студенческой среде, хотя по 13% дали отрицательный ответ [7; 9]. Для улучшения отношений предлагалось изменить группу, перестроить

¹ Исследованию подверглись студенты вторых-третьих курсов обоих учебных заведений, 60 и 80 человек соответственно, т.е., люди, уже имеющие определенный опыт вузовской жизни.

её, убрать отдельных лиц, иногда старосту, и тогда группа будет «более близка к идеалу» [7]. Однако никто из студентов персонально к себе это предложение не адресует, не рассматривает необходимость изменения своего собственного отношения к группе [там же].

Не только взаимоотношения между студентами облегчают или затрудняют процесс адаптации их к вузу. Важным фактором является и характер взаимоотношений между студентами и преподавателями. Студенты замечают всё: манеры и тон преподавателя, внешний вид, отношение к предмету, обстановку в аудитории, заинтересованность или равнодушие к успехам студентов. Разницу между учителем в школе и вузовским преподавателем отмечают все студенты. Им нравится обращение на «Вы» и «коллеги», но, по мнению многих, преподаватели субъективны, они выставляют баллы как бы «наугад», и с этим ничего нельзя поделать [7].

Наиболее трудной является адаптация к процессу учебы, особенно подготовке и проведению экзаменационных сессий в их традиционной форме и сдача модулей, результаты которых связаны с интеллектуальными, нравственными и психологическими возможностями студентов. Большинство их признаёт необходимость учиться, «чтобы добиться успеха». Как правило, студенты не сразу осознают насколько объем материала, изученного в школе, отличается от вузовского, критерии оценки знаний в вузе и отличие школьных экзаменов от высшей школы. Непривычность организации учебной деятельности и её форм порождают представление, что по сравнению со школой «здесь ничего не задают и поэтому можно жить легко» [7].

Меньшая, чем в школе, подотчетность, определённая свобода действий рассматривается скорее как достоинство студенческой жизни, чем как её недостаток. Серьёзное/несерьёзное отношение к учебному процессу проявляется в результатах текущей успеваемости.

По оценкам экспертов, успеваемость студентов на втором курсе по сравнению с первым значительно ниже, и только с третьего курса она заметно улучшается [9], особенно после прохождения производственной практики. Данные оценки могут служить косвенным показателем адаптации студентов к требованиям вуза. Соотношение между улучшением и ухудшением успеваемости всё же в пользу улучшения: только один из десяти опрошенных отметил снижение успеваемости, зато каждый пятый указал на изменение в сторону её улучшения [7]. В этой связи стоит обратить внимание на ответы о необходимости самообразования: все опрошенные отвечают утвердительно, но у респондентов-юношей доля отрицательных ответов о реализации ими самообразования больше, чем у женщин [там же].

Помимо названных, надо выделить проблему бытовой адаптации иногородних студентов. Им намного сложнее, чем местным студентам, приспособиваться к новым условиям жизни, потому что с отъездом из дома они лишаются каждодневной заботы семьи и родительской опеки.

Жизнь в общежитии можно считать самой существенной переменной в социализации молодого человека, ибо помимо учёбы ему надо выстраивать отношения с администрацией общежития, соседями по комнате, полностью обслуживать себя, принимать самостоятельные решения по социально-бытовым вопросам и т.п. Это отнимает много времени и сил, сказывается на успеваемости. В интервью, часто звучат одинаковые ответы: «дома все решения принимали родители», «придётся самому всё делать», «деваться некуда» и т.п. На втором курсе студенты, живущие в общежитии, отмечая отличие условий общежития от домашних, делают вывод: «ко всему можно привыкнуть» [8].

Все перечисленные факторы можно определять как трудности адаптации к новым людям, образу и стилю жизни, т.е. трудности становления личности молодого человека, исчезновения старых и появления новых установок и стереотипов поведения, соответствующих вузу.

Выводы

Проведенные исследования адаптации студентов к условиям вузовской жизни позволяют говорить о том, что это сложный, динамичный и многоуровневый процесс преобразования имеющихся взглядов, навыков и привычек в соответствии с новыми задачами и перспективами, порождаемыми условиями вуза.

В силу этого мнения студентов о проблемах их адаптации к вузовской жизни заслуживают внимания и учёта преподавателями не только социально-гуманитарных, но и специальных технических кафедр высшей школы.

Отмечая всю важность исследования адаптации студентов, особенно младших курсов, к требованиям вуза, можно было обосновать и рекомендовать администрации ОНМУ и преподавателям гуманитарных дисциплин организовать проведение социологических опросов силами преподавателей этих дисциплин с привлечением к исследованиям студентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Психологический словарь / Под ред. В.В. Давыдова. – М., 1983. – 446 с.*
2. *Социальная психология: словарь / Ред.-сост. Л.А. Карпенко; под общ. ред. А.В. Петровского. – М.: ПЕРСЭ, 2005. – 175 с.*
3. *Коджастирова Г.М. Педагогический словарь / Г.М. Коджастирова, А.Ю. Коджастиров – М., 2000. – 174 с.*
4. *Социологическая энциклопедия / Под общ. ред. А.Н. Данилова. – Мн.: Белорусская энциклопедия, 2003. – 384 с.*

5. *Введение в политологию: Словарь-справочник / Сост. Г.А. Купряшин; Под общ. ред. В.П. Пугачева. – М.: Аспект-Пресс, 1996. – 264 с.*
6. *Педагогика и психология высшей школы: Учебн. пособие. – Ростов-н/Д, 2002. – 486 с.*
7. *Аналитическая записка к социологическому исследованию: «Адаптация студентов к жизни в вузе». – Витебск: УО «ВГТУ», 2006. – 29 с.*
8. *Аналитическая записка к социологическому исследованию: «Особенности социализации студентов в условиях студенческого общежития». – Витебск: УО «ВГТУ», 2006. – 24 с.*
9. *Отчет о плавательной практике студентов судомеханического факультета ОНМУ. – Одесса: ОНМУ, 2006.*
10. *Сокурская Л.Г. Студенчество в условиях транзитивного общества: ценностный дискурс перехода // Социология. – 2004. – № 1.*
11. *Щёлокова Т.В. Адаптация первокурсников к условиям студенческой жизни: социологический анализ // Социология. – 2005. – № 12.*
12. *Тарантей В. и др. Молодежь на фоне жизни // Белорусская думка. – 2006. – № 2.*

Надійшла 12.05.06

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и прочность корабля

| | |
|--|----|
| Воробьев Ю.Л., Косой М.Б. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА В ПОЛОСЕ ФИКСИРОВАННОЙ ШИРИНЫ ПРИ ВЕТРЕ И ВОЛНЕНИИ | 3 |
| Егоров Г. В. О НЕОБХОДИМОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОЧНОСТИ КОРПУСОВ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО И СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ | 16 |
| Лукаш Э.П., Партолога М.И. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ | 37 |

Гидротехническое строительство

| | |
|--|----|
| Гришин В.А., Яременко Н.А. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ И НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ | 44 |
| Сурьянинов Н.Г. ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ ГРИНА ПРИ РЕШЕНИИ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ | 54 |
| Слободяник А.В. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ГРУНТОВАЯ СРЕДА-ШПУНТОВАЯ СТЕНКА» | 58 |
| Федорова Е.Ю. ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКИХ ПРОГРЕССИВНЫХ ВОЛН МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ДОННОМ ПРЕПЯТСТВИИ | 69 |

Портовая перегрузочная техника

| | |
|---|----|
| Нестеров Е.А. МЕТОД ЛОКАЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ КОРНЕВЫХ ШАРНИРОВ СТРЕЛОВЫХ СИСТЕМ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ | 79 |
| Андрienко А. О. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОБНОВЛЕНИЯ ПАРКА ПОРТОВЫХ КРАНОВ В МОРСКИХ ПОРТАХ УКРАИНЫ | 86 |
| Семенов П.А. МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ | 91 |
| Лимаренко А. М., Немчук А.О. К РАСЧЕТУ СТАНИН СТАНКОВ ПОРТАЛЬНОГО ТИПА | 97 |

Управление проектами и задачи оптимизации

| | |
|--|-----|
| Шахов А.В. ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОСТАВКАМИ НА РЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ | 103 |
| Чернов С.К., Титов С.Д. ФОРМАЛІЗАЦІЯ СКЛАДАННЯ СПРЯЖЕНИХ ЗАДАЧ ЛІНІЙНОЇ ОП- ТИМІЗАЦІЇ | 111 |
| Руденко С.В. ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ | 122 |
| Кириллова Е.В. ОБСНОВАНИЕ МАРШРУТА РАБОТЫ СУДНА С УЧЕТОМ ДИНА- МИКИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕВОЗКИ | 130 |
| Коноплев А.В., Стариков М.А. О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ .. | 150 |

Термодинамика и кондиционирование воздуха

| | |
|--|-----|
| Вассерман А.А. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ТАБЛИЦ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА И ЕГО ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ | 160 |
| Варбанец Р.А. УТОЧНЕНИЕ ФОРМУЛЫ СРЕДНЕЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗОВ В РАСЧЕТЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ | 173 |
| Вычужанин В.В., Кирилов В.Х. МНОГОСВЯЗНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНДИЦИОНИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ СУДНА | 180 |

Подготовка кадров

| | |
|---|-----|
| Кошарская Л.В., Турлак А.А., Турлак Т.А. АДАПТАЦИЯ СТУДЕНТОВ К ЖИЗНИ В ВУЗЕ | 186 |
|---|-----|

Наукове видання

ВІСНИК
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Збірник наукових праць

Випуск 20

*Українською, російською
та англійською мовами*

Видається з 1998 р.

*Свідоцтво про державну реєстрацію:
Серія КВ № 278
від 25.07.1997 р.*

Комп'ютерне верстання та розробка
оригінал-макету збірника – *Кобзева Н.Ю.*

Підписано до друку з оригінал-макету 18.10.06
Формат 70x108/16. Папір офсетний. Ум. друк. арк. 12,2.
Замовлення № 517.

Адреса редакційної колегії та Видавництва ОНМУ:
65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34,
тел. 728-31-14.