

ВІСНИК



ОДЕСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО
УНІВЕРСИТЕТУ

13

Міністерство освіти і науки України



ВІСНИК

**ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

13 ` 2004

ББК 39.42-011я43

В635

УДК 629.12.002(082)

Відп. редактор:

д-р техн. наук, проф. *Ю.Л. Воробійов*

Редакційна колегія:

д-р техн. наук, проф. *Шумлянський І. Ф.* (заст. відп. редактора),
д-р техн. наук, проф. *Аксютін Л.Р.*, 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. *Ланкіна І.О.*, д-р техн. наук, проф. *Макаренко Д.В.*,
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, с.н.с. *Пойзнер М.Б.*, д-р екон. наук, проф. *Постан М.Я.*,
д-р техн. наук, проф. *Радімов С.М.*, д-р техн. наук, проф. *Сизов В.Г.*,
д-р екон. наук, проф. *Чекаловець В.І.*, д-р техн. наук, проф. *Яковлев П.І.*,
д-р екон. наук, проф. *Якушенко В.Г.*, *Силакова Г.І.* (відп. секретар).

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.

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.

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.

Друкується за ухвалою Вченої ради
Одеського національного морського університету
від 28.04.2004 р. (протокол № 8).

ISBN 966-7716-21-X

© Одеський національний
морський університет, 2004

УДК 629.553

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ ГРУЗОВЫХ СУДОВ ОГРАНИЧЕННОГО РАЙОНА ПЛАВАНИЯ

Г. В. Егоров

В настоящей статье представлены некоторые результаты пред- и постпроектных исследований главных элементов современных нефтеналивных и сухогрузных судов ограниченного района плавания (СОРП), проведенных в Морском Инженерном Бюро (МИБ) и положенных в основу разработки концепции проектирования современных СОРП.

В процессе исследований был проведен комплексный анализ изменения длины L , ширины B , высоты борта D , осадки d , водоизмещения Δ , объема грузовых пространств $V_{гп}$, мощности главных двигателей $N_{мм}$, коэффициента общей полноты C_b .

В ранее опубликованных работах автора [8-11] отмечаются основные недостатки существующих СОРП, равно как и черты, привлекающие судовладельцев. К первым, безусловно, относится значительный возраст, ограниченная надежность конструкций и высокий уровень риска повреждений корпусов, ко вторым – их экономическая эффективность. Последнее обстоятельство в немалой степени обусловлено большой полнотой обводов и малыми, в сравнении с морскими судами, скоростями хода, благодаря чему двигатели имеют невысокую мощность и низкий расход топлива на ходу. В статье [11] приведены описание и сопоставление характеристики серийного танкера «Армада Лидер» пр. 005RST01, спроектированного МИБ, с другими нефтеналивными СОРП, в статье [6] – газовега смешанного плавания пр. 001RSG01, в [8-10] – сухогрузных СОРП пр. 006RSD02, 005RSD03, 003RSD04, 006RSD05, также спроектированных МИБ.

Сегодня совершенно очевидно, что пополнение флота СОРП, должно и будет иметь более прочные, а, следовательно, более тяжелые корпуса в сравнении с существующими. Таким образом, при сохранении размеров, формы корпуса и энерговооруженности неизбежно снижение грузоподъемности P_T при фиксированных проходных осадках и, следовательно, определенное падение экономической эффективности. Таковой представляется минимальная плата за снижения риска при эксплуатации [7].

В подобных обстоятельствах возникает весьма важный вопрос об использовании резервов повышения эффективности эксплуатации СОРП. Наиболее существенно на повышении эффективности сказывается увеличение P_r . На первый взгляд арсенал имеющихся у проектировщиков средств повышения P_r СОРП крайне ограничен.

Действительно, о выборе оптимальных, с точки зрения классической теории проектирования, размерений судна речи быть не может, поскольку габаритные размеры жестко лимитируются навигационными условиями эксплуатации на внутренних водных путях (ВВП) [4, 6, 11, 15].

Это означает, например, что длина L , ширина B и осадка d в реке судна, предназначенного для бесперевалочной перевозки грузов на линии «Европейские ВВП России – порты Средиземного моря», не могут существенно отличаться от соответствующих характеристик судов типа «Волго-Дон» (пр. 507Б, 1565, 05074М), которые определяются габаритными размерами шлюзов Волго-Донского речного канала (ВДРК).

Однако, несмотря на эти очевидные выводы, в трудах по проектированию СОРП излагаются практически те же подходы, что и для морских судов. Так, в книге [4] изложена классическая «морская» методика определения главных размерений и элементов судов внутреннего плавания, исходя из уравнения весов, когда L , B , D являются функциями дедвейта Dwt и скорости V_s (при этом величина осадки d может задаваться как постоянное ограничение). В книге [15] предлагается определение главных элементов, исходя из определения Δ через коэффициенты утилизации и путем совместного решения уравнений веса и мощности с последующим определением главных размерений и коэффициентов полноты.

В действительности, в реальном проектировании выбор L , B и осадки судна d в реке полностью определяются путевыми условиями, в первую очередь, габаритами шлюзов: полезной длины $L_{ВВП}$ и фактической ширины шлюзовой камеры $B_{ВВП}$.

Отсюда, согласно правилам пропуска судов [14], габаритная длина судна $L_M \leq L_{ВВП}$, ширина судна $B_M \leq (B_{ВВП} - \Delta B)$, где ΔB – запас по ширине, принимаемый равным в шлюзах шириной до 10 м – 0,4 м, до 18 м – 0,8 м, свыше 18 м – 1,0 м. Для шлюзов Северо-Двинской шлюзованной системы и в Кочетовском шлюзе ВДРК $\Delta B = 0,3$ м.

Пересчет от L_M к L может быть осуществлен с помощью данных из табл. 1, где приведены соответствующие соотношения для различных длин СОРП нового поколения. При этом обозначено: L_{pp}, L'_{pp} – длины

между перпендикулярами по ЛГВЛ и по ватерлинию при речной осадке соответственно; L' – длина по ватерлинию при речной осадке.

Таким образом, орудием проектировщика остается варьирование коэффициентом общей полноты C_b , скоростью хода V_s , рациональное конструирование связей корпуса, ведущее к минимизации его массы $P_{мк}$ и повышение $V_{гн}$, увеличивающее фактическую величину P_T для грузов с большим удельно-погрузочным объемом (УПО).

Таблица 1. Соотношения длин СОРП нового поколения

Проект	$\frac{L}{L_{pp}}$	$\frac{L'}{L'_{pp}}$	$\frac{L_M}{L}$	$\frac{L_M}{L_{pp}}$	$\frac{L_M}{L'}$	$\frac{L_M}{L'_{pp}}$
003RSD04	1,028	0,976	1,031	1,059	1,090	1,064
005RSD03	1,035	1,029	1,024	1,060	1,029	1,059
005RST01	1,027	1,021	1,018	1,046	1,023	1,044
006RSD02	1,027	1,012	1,016	1,043	1,030	1,042
006RSD05	1,024	1,013	1,015	1,039	1,025	1,038
007RSD07	1,027	1,012	1,011	1,038	1,026	1,038
Среднее значение	1,028	1,010	1,019	1,048	1,037	1,048

Для подавляющего большинства транспортных СОРП, имеющих числа Фруда в пределах $0,15 < Fr < 0,20$, значение коэффициента остаточного сопротивления и, соответственно, скорость V_s определяется, главным образом, величиной C_b .

При постоянном C_b рост отношения B/d приводит к примерно пропорциональному росту остаточного сопротивления, однако, в силу основного принципа проектирования СОРП - обеспечения наибольшей грузоподъемности при заданных путевых условиях, ширина судна выбирается максимально возможной для выбранных условий работы. Как правило, для СОРП, работающих через ВДРК и шлюзы Днепра, $B = 16,5$ м, а осадки определяются глубинами акватории портов, судоходных путей, порогов шлюзов, а также погодными условиями, поэтому B/d практически не подлежит изменению при проектировании и может приниматься в соответствии с данными табл. 2.

Среди отечественных СОРП следует выделять суда, предназначенные для работы по ВДРК, реке Днепр, системе Дунай-Майн-Рейн, Волго-Балтийскому каналу, Беломоро-Балтийскому каналу,

Сайменскому каналу и др. Таким образом, возможный диапазон изменения ширины составляет от 10,8 до 17,8 м.

Таблица 2. Фактические значения B/d по ограничениям путевых условий при $B = 16,5$ м

Путевые условия	Шлюзы Днепра	ВДРК	Мелководные порты Азовского моря	Порт Нека, Каспийское море
d , м	3,60	3,20-3,40	4,40-4,50	4,20
B/d	4,58	4,85-5,16	3,67-3,75	3,93

Каковы рациональные пределы повышения C_b и V_s ?

Все, без исключения, специалисты в области проектирования [1, 2, 13, 18, 19] отмечают, что рациональный выбор C_b и V_s – задача экономическая, конкретные же рекомендации для СОРП, основанные на прямом экономическом анализе, отсутствуют. Для решения проблемы выбора адекватного значения C_b проектируемых СОРП обратимся к известным рекомендациям, отражающим статистику существующих судов и представленным в табл. 3 и на рис. 1.

Следует отметить, что часть формул была представлена как зависимости $C_{bpp} = f(Fr_{pp})$, которые определялись по длине между перпендикулярами L_{pp} . Напротив, при проектировании СОРП в качестве расчетной принимается длина по ЛГВЛ L . Поэтому при построении графиков на рис. 1 были использованы очевидные зависимости $C_b / C_{bpp} = L_{pp} / L$ и $Fr / Fr_{pp} = \sqrt{L_{pp} / L}$.

Отношение L_{pp} / L для СОРП нового поколения $\approx 0,973 \pm 0,007$.

Данные, представленные на рис. 1, свидетельствуют о том, что суда, спроектированные МИБ, имеют C_b существенно более высокие, нежели существующие. Данные, встречающиеся в большинстве наиболее известных и распространенных классических работ [1, 2, 3, 13, 15-19], также рекомендуют более низкие значения C_b , чем принято в проектах МИБ.

Проектирование и мореходные качества судов

Таблица 3. Аналитические зависимости C_b от Fr по данным различных авторов

Формула	Автор	Источник	Номер на рис. 1
$C_{bpp} = 1,06 - 1,68Fr_{pp}$	H.F. Alexander	[18]	(1)
$C_{bpp} = 1,105 - 1,68Fr_{pp}$	С.И. Логачев	[12]	(2)
$C_b = 0,967 - 0,495Fr - 3,915Fr^2$	В.М. Штумпф	[17]	(3)
$C_b = 0,967 - 0,470Fr - 3,530Fr^2$	В.М. Штумпф	[17]	(4)
$C_{bpp} = -4,22 + 27,8\sqrt{Fr_{pp}} - 39,1Fr_{pp} + 46,6Fr_{pp}^3$	G. Jensen	[18]	(5)
$C_{bpp} = \frac{0,23}{Fr_{pp}^{2/3}}$	H. Schneekluth	[18]	(6)
$C_{bpp} = 0,14 / Fr_{pp}$	H. Schneekluth	[18]	(7)
$C_{bpp} = 1,05 - 1,4Fr_{pp}$	A.L. Ayre	[18]	(8)
$C_{bpp} = 0,455Fr_{pp}^{-\frac{1}{3}}$	В.В. Ашик	[1]	(9)
$C_b = 0,45 + (1,05 - Fr)^9$	А.Б. Карпов	[13]	(10)
$C_b = 1,04 - 0,98Fr$	Г.В. Егоров		(11)
$C_b = 1,02 - 0,52Fr - 2,5Fr^2$	Г.В. Егоров		(12)
$C_{bpp} = 1,18 - 2,00Fr_{pp}$	И.А. Титов	[16]	(13)
$C_{bpp} = 1 - \frac{0,48}{1 + 100e^{-24Fr_{pp}}}$	А.Н. Вапедченко	[15]	(14)
$C_{bpp} = 1 - \frac{0,50}{1 + 100e^{-22Fr_{pp}}}$	А.Н. Вапедченко	[3]	(14а)
$C_{bpp} = 1,21 - 2,3Fr_{pp}$	А.В. Бронников	[2]	(15)

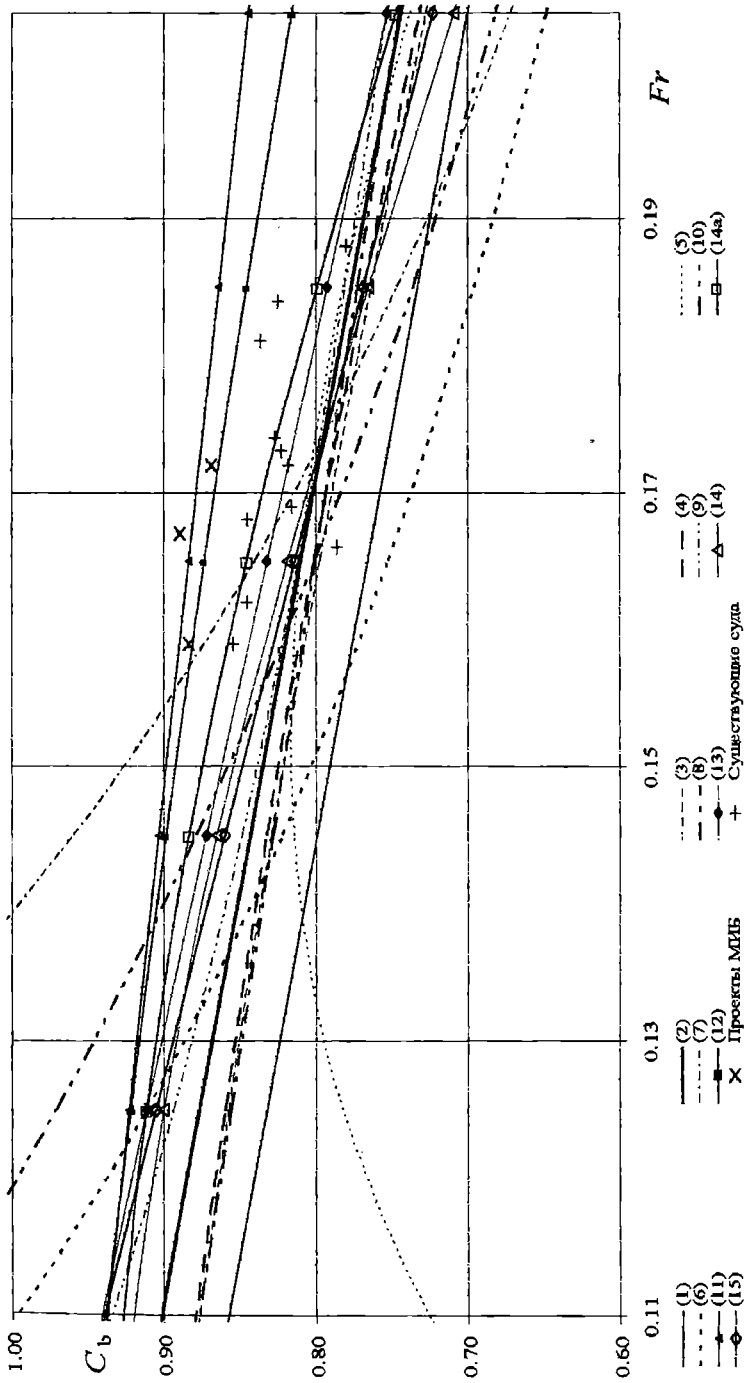


Рис. 1. Графические зависимости C_b от Fr по данным различных авторов

С целью анализа ситуации был произведен расчет изменения чистого дохода за год $\mathcal{C}\mathcal{D}$ для судна максимально возможной грузоподъемности P_r , работающего на линии «Европейские ВВП России – порты Средиземного моря». Расчет производился на основе методологии современных работ в области внешней задачи проектирования и экономики водного транспорта [5, 12]. В процессе расчетов $\mathcal{C}\mathcal{D}$ выполнялись вариации C_b в пределах от 0,80 до 0,90 и V_s – от 7,0 до 11,0 уз. За базу (100%) брались показатели эталонного судна с $C_b = 0,860$ и $V_s = 9,0$ уз (судно типа «Волго-Дон»).

Результаты расчетов, представленные на рис. 2, свидетельствуют о безусловном повышении прибыльности с ростом значения C_b , по крайней мере, до 0,900. Повышение скорости, в основном, благоприятно сказывается на величине $\mathcal{C}\mathcal{D}$, однако, последний зависит также от фрахтовой ставки RF и типа движительно-рулевого комплекса (ДРК), причем зависимость имеет максимальное значение, после достижения которого величина $\mathcal{C}\mathcal{D}$ прекращает рост. Результаты произведенных расчетов подтвердили известный факт, что при более высокой величине RF критическое значение скорости, при которой $\mathcal{C}\mathcal{D}$ перестает расти, увеличивается.

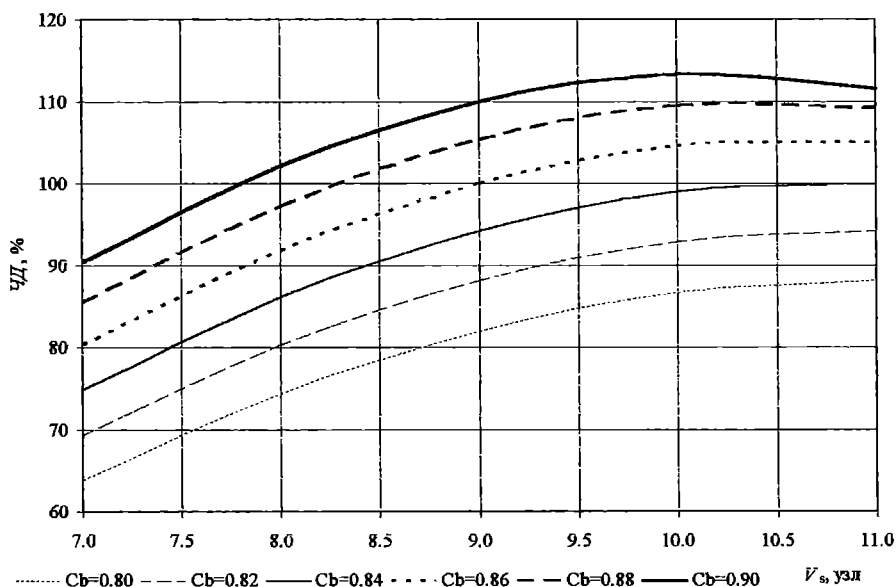


Рис. 2. Влияние скорости хода и коэффициента общей полноты на изменение чистого дохода за год $\mathcal{C}\mathcal{D}$

Полученные результаты были использованы МИБ при выборе C_b и V_S новых проектов, что позволило сформулировать рекомендации в виде аналитических зависимостей

$$C_b = 1,04 - 0,98Fr \text{ и } C_b = 1,02 - 0,52Fr - 2,5Fr^2,$$

которые справедливы при $Fr < 0,20$, что соответствует реальному диапазону скоростей грузовых СОРП.

Некоторые характеристики существующих СОРП и новых проектов, разработанных МИБ в соответствии с изложенной в [8-11] методикой, приведены в табл. 4 (танкера) и табл. 5 (сухогрузные суда). Информация по существующим СОРП дана с учетом модернизации и увеличения металлоемкости в результате подкреплений их корпусов.

Удельная металлоемкость судов из табл. 5 в традиционном виде $p_{mk} = P_{mk} / LBD$ приведена на рис. 3. С учетом отмеченного выше указания о развитых надпалубных конструкциях можно рекомендовать применение показателя удельной металлоемкости в виде

$$p_{mk} = P_{mk} / LBD', \text{ где } D' = D + \frac{L_{гп} \cdot B_{гп} \cdot h_k}{L \cdot B} - \text{приведенная высота борта,}$$

$L_{гп}, B_{гп}$ – длина и ширина грузового пространства, h_k – высота комингса люка (тронка для танкера). Пересчитанная таким образом величина p_{mk} приведена для сухогрузных судов на рис. 4, для танкеров смешанного плавания – на рис. 5.

Для сухогрузных СОРП нового поколения класса II с ледовой категорией ЛУ2 можно рекомендовать зависимость $p_{mk} = 0,8645 - 0,1469 \cdot 10^{-6} LBD'$, т/м³. Следует отметить, что незначительное изменение p_{mk} связано с использованием для основного корпуса судов длиной более 120-125 м сталей повышенной прочности, а для наиболее нагруженных элементов эквивалентного бруса (продольных непрерывных комингсов) – во всем характерном диапазоне длин. Принятая концепция назначения толщин на уровне минимальных позволила не увеличивать удельную металлоемкость P_{mk} / LBD' для СОРП с развитыми надпалубными конструкциями, хотя в абсолютном исчислении масса металлического корпуса в силу роста требований Правил Регистра (РС) безусловно выросла (см. табл. 4 и 5).

Степень изменения весовых характеристик корпуса сухогрузного СОРП в зависимости от класса, ледовой категории, системы набора борта и срока службы приближенно можно оценить по табл. 6.

Таблица 4. Некоторые характеристики танкеров ограниченных районов плавания

Проект	$L \times B \times D$, м	$L_{\text{мт}}$, м	$B_{\text{мт}}$, м	h_k , м	D' , м	$P_{\text{в}}$, т	$P_{\text{мт}}$, т	$N_{\text{мт}}$, кВт	Δ , т	$N_{\text{мт}}/\Delta$, кВт/т	ρ_1 , т/м ³	ρ_2 , т/м ³	$\frac{P_{\text{мт}}}{LBD}$, т/м ³	$\frac{P_{\text{мт}}}{LBD}$, т/м ³
Проекты МИБ														
005RST01	136,2×16,5×6	96,8	13,52	0,63	6,37	1794,4	1593,6	2160	8832	0,2446	0,62	0,84	0,118	0,111
Существующие суда														
1577*	128,64×16,5×5,5	0	0	0	5,50	1730	1035	1472	6476	0,2273	0,81	0,81	0,089	0,089
550*	128,64×16,5×5,5	0	0	0	5,50	1642	982	1472	6476	0,2273	0,82	0,82	0,084	0,084
621*	119,55×14,8×5,2	0	0	0	5,20	1568	938	1280	5393	0,2373	1,04	1,04	0,102	0,102
P77*	105×14,8×4,4	0	0	0	4,40	944	565	1028	3840	0,2677	0,86	0,86	0,083	0,083
1677M	124,51×16,6×6,9	0	0	0	6,90	2516	1505	2208	8837	0,2499	0,58	1,02	0,106	0,106
630*	135,84×16,5×6,4	0	0	0	6,40	2153	1288	1764	8556	0,2062	0,67	0,93	0,090	0,090
RST09**	88,28×12×5,8	44	9	1,82	6,48	1127	674	920	3848	0,2391	0,82	0,97	0,110	0,098

* - характеристики судна даны с учетом подкрепленной корпуса на класс РС и увеличением осадки по ЛГВЛ.

** - судно после крупных переоборудований

$L \times B \times D$ - расчетные длина (по ЛГВЛ), ширина, высота судна.

L_m , B_m - длина и ширина грузовой постройке.

h_k - высота комингса лока (тронка для танкера).

$D = D + \frac{L_m \cdot B_m \cdot h_k}{L \cdot B}$ - приведенная высота борта.

P_v , P_m - масса корпуса и масса металлического корпуса.

N - мощность главных двигателей.

Δ - водоизмещение по ЛГВЛ.

ρ_1 , ρ_2 - спецификационная плотность на осадку в реке (3,60 м) и по ЛГВЛ ($\rho = P_v / V_m$).

h_1 , h_2 - спецификационная УТЮ на осадку в реке (3,60 м) и по ЛГВЛ ($h = V_m / P_v$).

(где P_v - стреленос для соответствующей осадки)

Таблица 5. Некоторые характеристики сухогрузов ограниченных районов плавания

Проект	L x B x D, м	L _{св.} , м	B _{св.} , м	h _{к.} , м	D', м	P _{к.} , т	P _{св.} , т	N _{св.} , кВт	Δ, т	N _{св.} /Δ, кВт/т	v _{к.} , м ³ /т	v _{св.} , м ³ /т	P _{св.} / LBD', т/м ³	P _{к.} / LBD', т/м ³
003RSD04	87,05x15,6x5,75	59,15	13,2	1,5	6,61	896,4	756,8	1290	4985	0,2588	2,07	1,36	0,097	0,084
005RSD03	105,82x16,5x5,5	75,3	12,7	3,75	7,55	1359,7	1139,2	2040	7479	0,2728	2,48	1,49	0,119	0,086
006RSD02	137,44x16,5x6	104,6	12,7	3,33	7,95	1708,2	1499,8	2300	9586	0,2399	2,42	1,64	0,110	0,083
006RSD05	137,44x16,5x6	105,3	13,2	3,33	8,04	1753,1	1546,7	2240	9586	0,2337	2,61	1,71	0,114	0,085
007RSD07	138,51x16,5x6	105,3	12,7	3,33	7,95	1712	1504	2240	9716	0,2305	2,41	1,62	0,110	0,083
Существующие суда														
781*	93x13x5,5	65,78	9,35	0,75	5,88	1044	625	736	3846	0,1914	1,62	1,33	0,094	0,088
1743*	106,03x14,8x5	71,4	10,9	1	5,50	1198	717	824	4375	0,1883	1,44	1,44	0,091	0,083
791*	110,69x13x5,5	84,16	9,35	0,75	5,91	1140	682	972	4450	0,2184	1,53	1,42	0,086	0,080
1557*	110,86x13x5,5	75,08	9,35	0,74	5,86	1271	760	972	4624	0,2102	1,52	1,34	0,096	0,090
2-95*	110,9x13x5,5	79,05	9,52	1,12	6,08	1255	751	1030	4761	0,2103	1,66	1,43	0,095	0,086
1565*	136,07x16,5x5,5	94,8	13,22	1	6,06	1665	996	1766	6923	0,2551	1,26	1,26	0,081	0,073
19610*	136,15x16,4x6,7	87,45	11,82	1,01	7,17	2640	1579	1940	8917	0,2176	1,95	1,16	0,106	0,099
19611*	114,03x16,4x6,7	64,9	11,82	1,01	7,11	2390	1430	1940	7306	0,2655	2,08	1,12	0,114	0,107
19620*	85,08x12x6	41,25	9	1	6,36	1067	638	1030	3822	0,2695	1,09	0,85	0,104	0,098
326.1*	80,51x11,6x4	41,3	9,2	3,2	5,30	992	593	882	3143	0,2806	1,4	1,17	0,159	0,120
05074A*	105,03x16,5x5,5	64,8	12,6	1,45	6,18	1778	1064	1766	6010	0,2938	1,5	1,16	0,112	0,099
17310	93,77x13,4x6,7	59,7	10,3	2,38	7,86	1760	1053	1740	5602	0,3106	2,66	1,24	0,125	0,107
613	92,99x13x5,5	60	10,2	1,04	6,03	1388	830	736	3945	0,1866	2,04	1,5	0,125	0,114
488AM2/3*	115,98x13,2x6	79,2	9,2	0,86	6,41	1742	1042	1280	5574	0,2296	1,83	1,3	0,113	0,106
1572*	117,68x15x6,5	79,2	8,35	1,23	6,96	2050	1226	1620	6752	0,2399	2,58	1,37	0,107	0,100
05074M**	136,29x16,5x5,5	96	13,3	3,58	7,53	2086	1248	1766	7431	0,2377	2,01	1,81	0,101	0,074
507B**	136,31x16,5x5,5	96	13,3	3,58	7,53	1809	1082	1766	7468	0,2365	1,9	1,71	0,087	0,064
002CINF01*	106x16x6,25	0	0	0	6,25	1565	936	1300	4512	0,2881			0,088	0,088

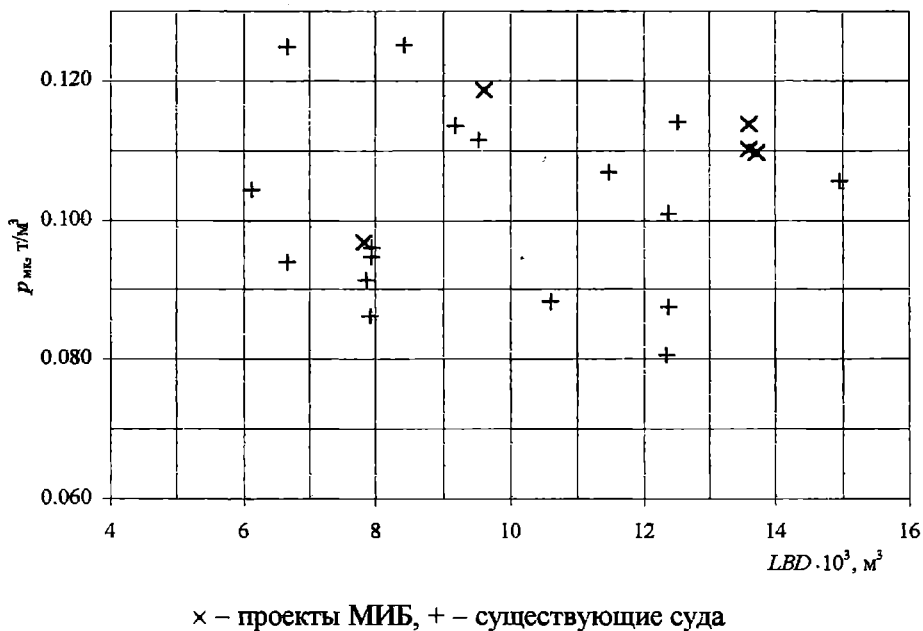


Рис. 3. Измеритель массы металлического корпуса для сухогрузного СОРП

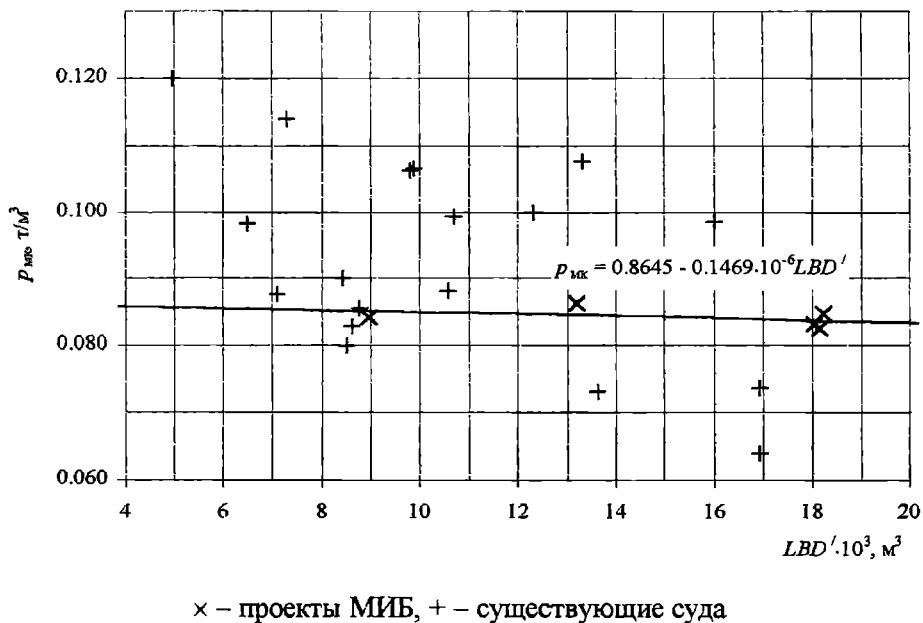


Рис. 4. Измеритель массы металлического корпуса для сухогрузного СОРП (с учетом приведенной высоты борта)

Таблица 6. Результаты изменения весовых характеристик корпуса сухогрузного СОРП в зависимости от класса, ледовой категории, системы набора борта и срока службы

Ледовая категория	$R_{сн}$, МПа	Класс РС	Срок службы, лет	Изменение веса корпуса по отношению к базовому варианту, %
				при системе набора борта (продольная / поперечная)
ЛУ2	315	ПСП	24	-3,8 / -3,8
			15	-4,6 / -4,6
		ШСП	24	-5,4 / -5,5
			15	-5,9 / -6,0
	235	ПСП	24	0 (базовый вариант) / -0,1
			15	-0,1 / -0,4
		ШСП	24	-2,2 / -2,5
			15	-2,6 / -2,9
ЛУ1	315	ПСП	24	-4,7 / -4,9
			15	-4,9 / -5,1
		ШСП	24	-6,4 / -6,7
			15	-7,1 / -7,3
	235	ПСП	24	-0,9 / -1,1
			15	-1,4 / -1,6
		ШСП	24	-3,5 / -3,7
			15	-3,9 / -4,2

Структурный анализ металлоемкости по группам связей корпусов сухогрузных СОРП нового поколения приведен в табл. 7.

Из табл. 7 видно, что наибольшую долю в общей массе корпуса имеет двойное дно – 34...36%. Доля двойного борта (27...30%) и палубных конструкций (17...20%) также практически постоянна и мало зависит от длины судна. Доля надстроек и рубок уменьшается с ростом L от 6,4% до 3,2%, что объясняется сохранением или незначительным ростом численности экипажа, для которого она предназначена.

Сравнивая с данными сухогрузного судна пр. 507Б из [11], можно, сделать вывод, что при сохранении относительной доли палубы, снизились доли конструкций днища и бортов при увеличении доли поперечных переборок и надстройки (за счет весьма заметного роста требований Правил к этим элементам корпусов).

По номенклатуре связей структурный анализ составляющих массы корпуса сухогрузных СОРП проведен в табл. 8.

Таблица 7. Относительное распределение массы корпуса сухогрузных СОРП по группам связей

Судно	Относительная доля группы связи, %					
	Днище	Борта	Палубы	Переборки поперечные	Надстройки и рубки	Прочее
Сухогрузное судно $L = 87,05$ м	34,1	28,1	17,2	7,3	6,4	7,0
Сухогрузное судно $L = 105,8$ м	34,6	29,7	17,2	9,3	3,6	5,6
Сухогрузное судно $L = 138,5$ м	36,0	27,2	20,2	8,3	3,2	5,1
Пр. 507Б	41	33,4	17,6	2,7		5,3

Наибольшую долю в общей массе составляет масса настилов и обшивки – 52-57%. Значительна роль рамных связей – 20-22%. Доля холостого набора меньше (около 10%). Обращает на себя внимание незначительная изменчивость относительных долей связей по номенклатуре при изменении L .

Следует отметить, что возросла роль рамных поперечных связей (10-12%). На судах пр. 507Б их доля составляла около 8 %, что связано с широким применением малых толщин 5-7 мм. Выросли также доля продольных ребер жесткости за счет использования более мощных профилей при сохранении малой продольной шпации и доля продольных рамных связей.

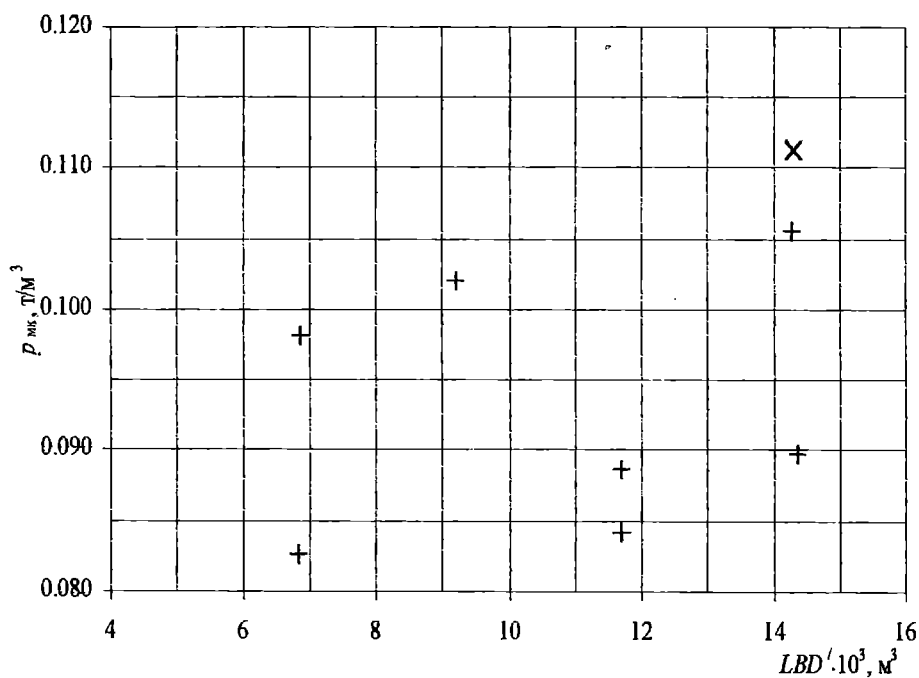
В целом это свидетельствует о некотором перераспределении металлоемкости в пользу набора.

Еще одной возможностью повышения эффективности современных СОРП является увеличение вместимости грузовых помещений. При неизменном водоизмещении, в условиях ограничений длины и ширины судна, повышение вместимости возможно лишь за счет увеличения длины и высоты грузового пространства.

Увеличение длины грузового пространства на проектах МИБ (005RST01, 006RSD02, 003RSD04, 005RSD03, 006RSD05) было реализовано за счет применения впервые в отечественной практике (на грузовых судах) в качестве ДРК винто-рулевых колонок (ВРК), которые позволили сократить длину машинного отделения примерно на 20 %, отказаться от ахтерпика и румпельного отделения, а также обеспечить требуемую управляемость и ходкость в стесненных условиях, сократить

затраты на монтаж и предполагаемые затраты на ремонт и обслуживание. Выбор ВРК в качестве ДРК для проектов МИБ производился на основании специальных стоимостного, массо-габаритного и риск-ориентированного исследований в сравнении с обычными одно- и двухвальными модификациями проектов.

Увеличение высоты грузового пространства позволяет повысить общую продольную прочность за счет увеличения расстояния между крайними связями эквивалентного бруса. Более рациональное распределение материала, в свою очередь, приводит к незначительному повышению металлоемкости при существенном увеличении момента сопротивления эквивалентного бруса. Этот вывод хорошо иллюстрируется данными изменения весовых показателей, представленными на рис. 4 и 5.



× – проекты МИБ, + – существующие суда

Рис. 5. Измеритель массы металлического корпуса нефтеналивных СОРП

Таблица 8. Относительное распределение массы корпуса сухогрузных СОРП по номенклатуре связей

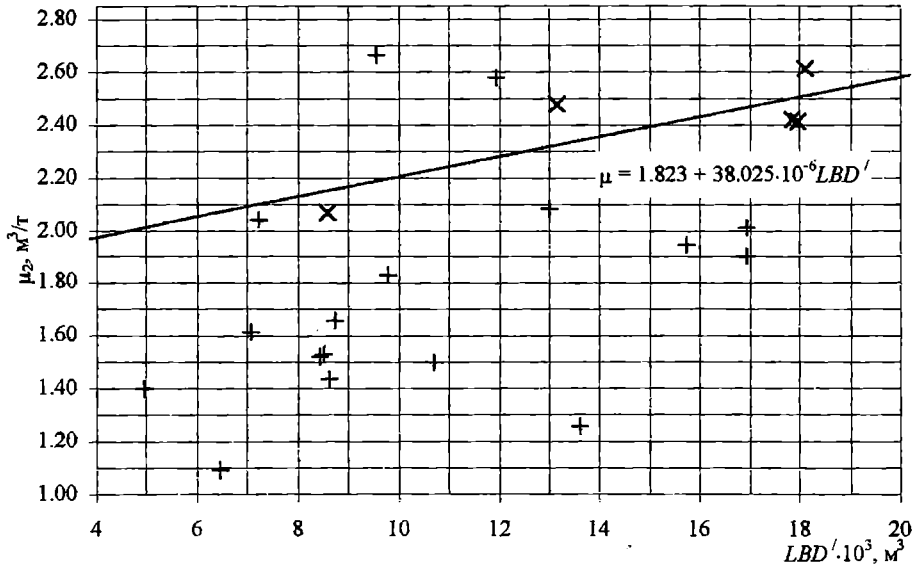
Судно	Относительная доля связи по номенклатуре, %							
	Обшивки и настилы	Рамный продольный набор	Рамный поперечный набор	Рамный набор переборок	Продольный набор	Поперечный набор	Набор переборок	Прочее
Сухогрузное судно $L = 87,05$ м	52,2	10,6	11,1	1,0	5,7	3,1	1,7	14,6
Сухогрузное судно $L = 105,8$ м	56,9	6,9	12,2	0,9	8,0	1,8	1,7	11,4
Сухогрузное судно $L = 138,5$ м	54,6	11,3	10,7	0,4	8,9	0,9	1,3	11,8

Сопоставление удельной грузоемкости спроектированных МИБ и существующих СОРП приведены на рис. 6, 7, 8, 9. Увеличение вместимости грузовых помещений судов, спроектированных МИБ, сопровождается увеличением удельной грузоемкости на осадках, соответствующих условиям ВВП России и Украины.

Для определения удельной грузоемкости сухогрузных СОРП при осадке по ЛГВЛ можно рекомендовать зависимость $\mu_2 = 0,1064 + 0,03264 \cdot 10^{-3} LBD'$, м³/т.

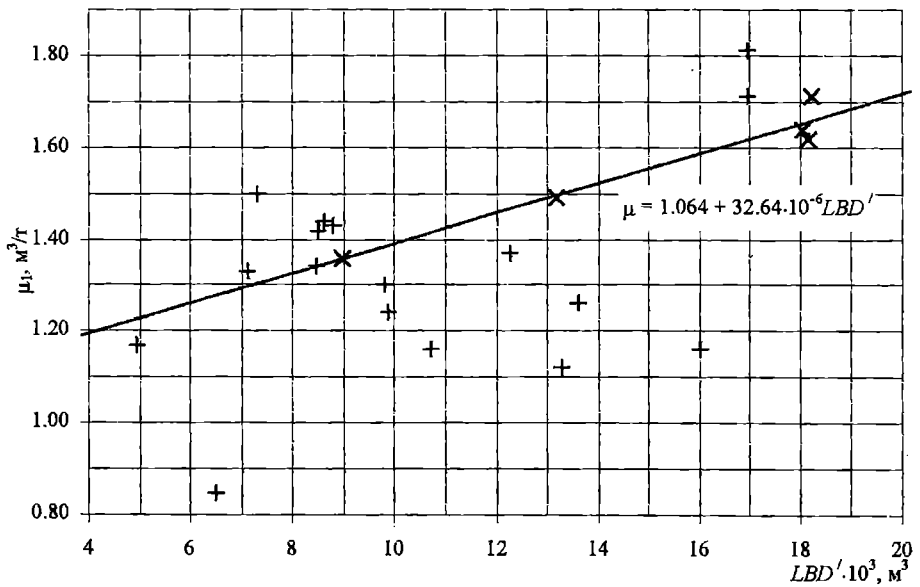
Для определения удельной грузоемкости сухогрузных СОРП при осадке в реке (3,60 м) можно рекомендовать зависимость $\mu_1 = 1,823 + 0,03802 \cdot 10^{-3} LBD'$, м³/т.

Некоторое повышение энерговооруженности судов (рис. 10, 11), спроектированных МИБ, позволяет, прежде всего, увеличить скорость при движении на волнении, что вполне допустимо по условиям прочности их корпусов, приводит к сокращению потерь времени в ожидании благоприятной погоды, в сравнении с существующими СОРП, и, в конечном итоге, существенно повышает их экономическую эффективность.



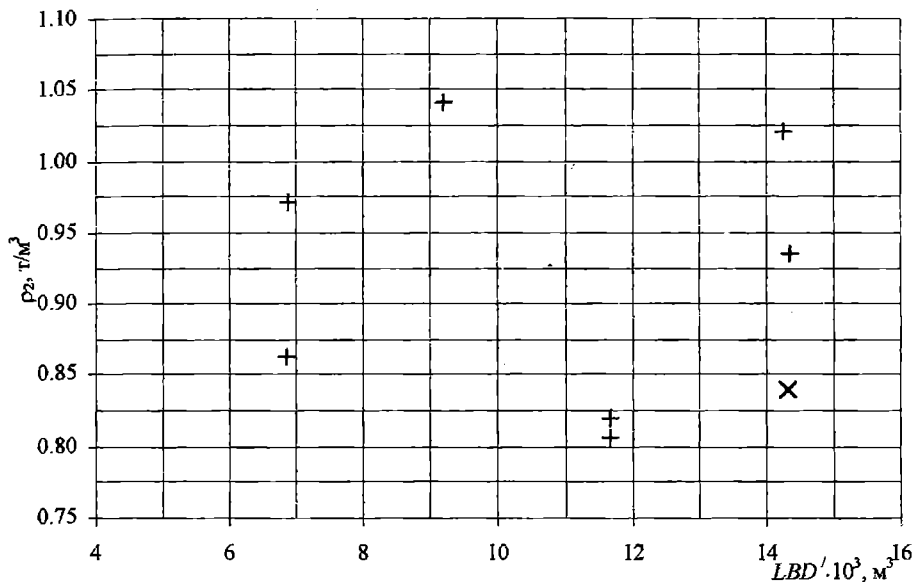
x – проекты МИБ, + – существующие суда

Рис. 6. Удельная грузоподъемность сухогрузного СОРП (при осадке по ЛГВЛ)



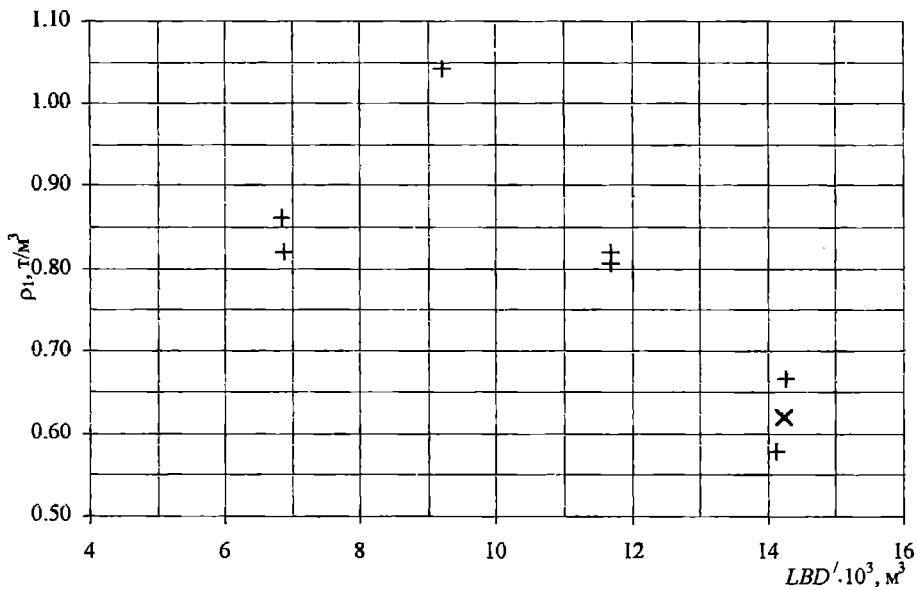
x – проекты МИБ, + – существующие суда

Рис. 7. Удельная грузоподъемность сухогрузного СОРП (в реке при осадке 3,60 м)



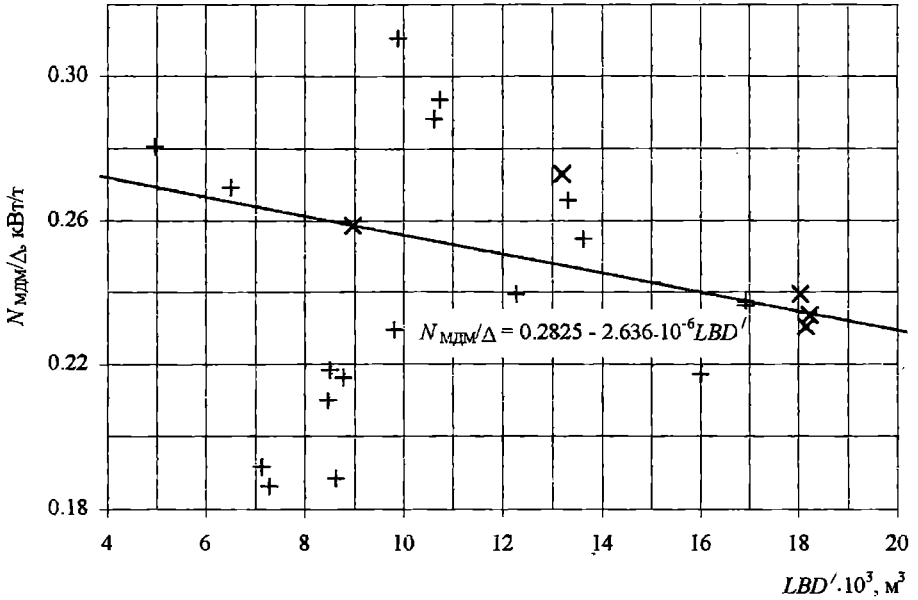
x – проекты МИБ, + – существующие суда

Рис. 8. Спецификационная плотность нефтеналивных СОП (при осадке по ЛГВЛ)



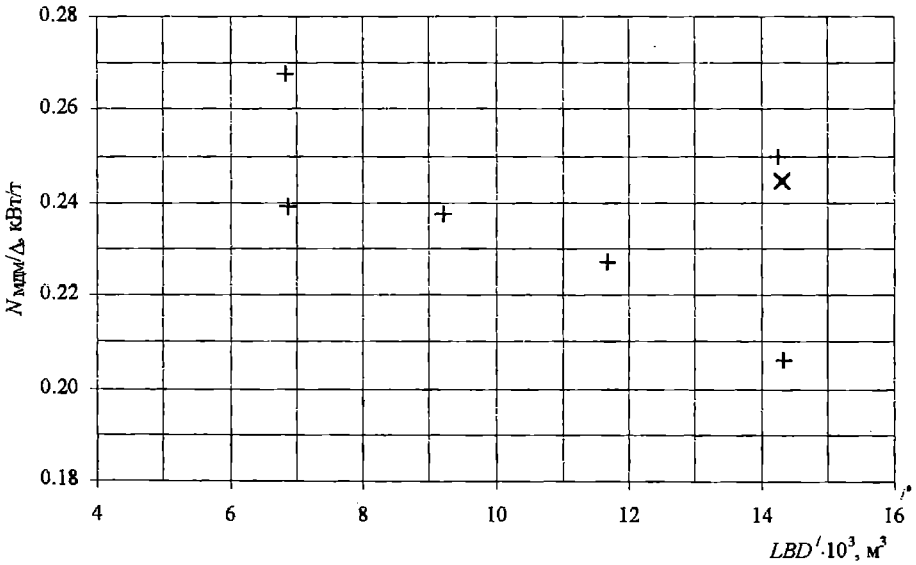
x – проекты МИБ, + – существующие суда

Рис. 9. Спецификационная плотность нефтеналивных СОП (в реке при осадке 3,60 м)



× – проекты МИБ, + – существующие суда

Рис. 10. Энерговооруженность сухогрузных СОРП



× – проекты МИБ, + – существующие суда

Рис. 11. Энерговооруженность нефтеналивных СОРП

Для определения мощности главных двигателей была получена аналитическая зависимость $N_{\text{МДМ}} / \Delta = 0,2825 - 2,636 \cdot 10^{-6} LBD'$, кВт/т, которая обеспечивает получение эксплуатационной скорости $V_s \approx 10,5$ узлов. При этом отклонение от зависимости было зафиксировано только для одного из новых проектов, где по решению судовладельца были выбраны главные двигатели с избыточной мощностью.

В результате, был создан фундамент для эффективного применения риск-ориентированных методов проектирования СОРП как объектов с ограниченной надежностью, но с увеличенной эффективностью в сравнении с морскими судами.

При этом были получены зависимости для выбора главных характеристик грузовых судов ограниченного района плавания на стадии предварительного проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашик В.В. Проектирование судов: Учебник. - Л.: Судостроение, 1985. - 320 с.
2. Бронников А.В. Проектирование судов. - Л.: Судостроение, 1991. - 320 с.
3. Вашедченко А.Н. Автоматизированное проектирование судов. - Л.: Судостроение, 1985. - 164 с.
4. Вицинский В.В., Страхов А.П. Основы проектирования судов внутреннего плавания. - Л.: Судостроение, 1970. - 454 с.
5. Войлошников М.В. Морские ресурсы и техника: эффективность, стоимость, оптимальность. - Владивосток: Издательство ДВГТУ, 2002. - 586 с.
6. Егоров Г.В. О проблеме создания судов-газовозов смешанного плавания // Проблемы техники. - 2003. - № 1. - С. 23-38.
7. Егоров Г.В. Использование теории риска при проектировании современных судов // Проблемы техники. - 2003. - № 2. - С. 40 - 57.
8. Егоров Г.В. Принципы создания нового поколения транспортных судов ограниченных районов плавания // Сб. трудов 7 междунар. конф. по судостроению, судоходству, оборудованию морских платформ и обеспечивающих их работу плавсредств, морская техника для освоения океана и шельфа «Нева 2003». - СПб, 2003. - С. 29-32.
9. Егоров Г.В. Суда смешанного плавания нового поколения // Сб. докладов 7 междунар. конф. «Эффективное формирование национальной сети международных транспортных коридоров». - Одесса, 2003. - С. 167-171.

10. Егоров Г.В. О конструкции судов ограниченных районов плавания нового поколения // Труды НТК по СМК памяти акад. Ю.А. Шиманского. - СПб: ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова, 2003. - С. 20-22.
11. Егоров Г.В. Танкер смешанного река - море плавания дедвейтом 6440 тонн «Армада Лидер» с винто-рулевыми колонками // Висник ОНМУ. - Одеса: ОНМУ, 2003. - Вип. 12. - С. 3-19.
12. Краев В.И., Пантина Т.А. Экономическая оценка инвестиций на водном транспорте. - СПб: Издательство СПбГПУ, 2003. - 299 с.
13. Ногид Л.М. Проектирование морских судов. - Л.: Судостроение, 1976. - 208 с.
14. Правила пропуска судов и составов через шлюзы внутренних водных путей Российской Федерации. - Министерство транспорта Российской Федерации, 2002.- 18 с.
15. Проектирование судов внутреннего плавания / Н.К. Дормидонтов, В.Н. Анфимов, П.А. Малый и др. - Л.: Судостроение, 1974. - 335 с.
16. Проектирования морських транспортних суден / О.І. Кротов, В.І. Голиков, О.Ю. Єганов, О.В. Бондаренко. - Миколаїв: УДМТУ, 2003. - 152 с.
17. Титов И.А. Выбор основных элементов крупнотоннажных судов с полными образованиями // Судостроение. - 1988. - №2. - С. 8 - 11.
18. Турбал В.К., Шпаков В.С., Штумпф В.М. Проектирование обводов и движителей морских транспортных судов. - Л.: Судостроение, 1983. - 304 с.
19. Schneekluth H., Bertram V. Ship Design for Efficiency and Economy. - Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. - 220 p.

УДК 629.12.532.5.073

**ВЕРОЯТНОСТЬ СОХРАНЕНИЯ ФИКСИРОВАННОЙ ШИРИНЫ
ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЕТРА И
ВОЛНЕНИЯ**

М. Б. Косой

Перечень обозначений

Главные размерения и характеристики судна

L – длина между перпендикулярами;

B – ширина по действующую ватерлинию;

T, T_n, T_k – осадка на миделе, носом, кормой;

H – высота борта;

S_y, S_{yb} – площадь проекции погруженной части диаметральной плоскости судна и надводной части голого корпуса на плоскость xOz ;

$\bar{l}_i = \frac{l_i}{L}$ – приведённая к длине судна L длина l_i i -й надстройки;

$\bar{h}_i = \frac{h_i}{H}$ – приведённая к высоте борта H высота h_i i -й надстройки;

$\bar{x}_f = \frac{x_f}{L}$ – приведённая к длине судна L абсцисса x_f центра

тяжести площади КВЛ;

$m, \lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{26}, \lambda_{66}$ – масса, присоединённые массы и моменты инерции судна.

Коэффициенты уравнений управляемости и характеристики движения судна

$$m_{11} = \frac{2(m + \lambda_{11})}{\rho S_y L}; m_{22} = \frac{2(m + \lambda_{22})}{\rho S_y L}; m_{26} = \frac{2\lambda_{26}}{\rho S_y L^2}; m_{66} = \frac{2(J_z + \lambda_{66})}{\rho S_y L^3},$$

ρ, ρ_w – плотность морской воды и воздуха;

$u(t)$ – скорость хода; $\varphi(t)$ – угол рыскания; $\beta(t)$ – угол дрейфа;

$\Omega(t) = \dot{\varphi}(t)$ – угловая скорость рыскания судна;

$\omega(t) = \Omega \frac{L}{u}$ – относительная угловая скорость рыскания;

$\eta(t), \dot{\eta}(t)$ – относительное (в долях длины судна) смещение судна в направлении оси Oy и скорость этого смещения, соответственно;

$\bar{n}_y^\beta, \bar{m}_z^\beta$ – позиционные производные поперечной силы и момента рыскания на корпусе судна [1];

$\tilde{n}_y^\omega, \tilde{m}_z^\omega$ – вращательные производные поперечной силы и момента рыскания на корпусе судна [1];

$$n_a(t) = \frac{2N_a}{\rho u S_y}, \text{ где } N_a \text{ – суммарная возмущающая сила, вызванная}$$

ветром и волнением;

$$m_a(t) = \frac{2M_a}{\rho u S_y L}, \text{ где } M_a \text{ – суммарный возмущающий момент,}$$

вызванный ветром и волнением;

$$2b \text{ – ширина полосы движения судна (ширина ПДС), } B_n = \frac{b}{L}.$$

Управляемость судна – это мореходное качество, которое характеризует способность комплекса, состоящего из судового корпуса, средств управления и рулевого (регулятора) двигаться по заданной траектории [1]. Испытывая действие ветра и волнения, судно, двигаясь вдоль траектории, занимает в горизонтальной плоскости некоторую полосу. Ширина полосы движения судна (ширина ПДС) является интегральным показателем управляемости. Зная ширину ПДС при различных ветро-волновых условиях, можно решать не только конкретные оперативные задачи по безопасному управлению судном, но и общие проблемы проектирования и эксплуатации морских путей и подходов каналов к акваториям портов.

Движение судна, на которое действуют силы ветра и волнения, описывается линейной системой дифференциальных уравнений (1), справедливых с точностью до членов третьего порядка малости

$$\begin{cases} -(m + \lambda_{22})u \frac{d\beta}{dt} + \lambda_{26} \frac{d\Omega}{dt} + (m + \lambda_{11})u\Omega = N_y; \\ (J_z + \lambda_{66}) \frac{d\Omega}{dt} - \lambda_{26}u \frac{d\beta}{dt} - (\lambda_{22} - \lambda_{11})u^2 \beta + \lambda_{26}u\Omega = M_z, \end{cases} \quad (1)$$

где N_y и M_z – суммарные сила и момент, действующие на судно.

На рис.1 показаны координатная система, положительные направления отсчёта кинематических характеристик движения и сил (моментов), действующих на судно. Процессы силового воздействия ветра и волнения на движущееся судно можно считать стационарными и однородными в широком смысле случайными процессами. В силу линейности системы (1) характеристики движения судна β, φ, ω , и η также являются стационарными случайными процессами. Преобразуем,

следуя [1], систему (1) к безразмерному виду, оставив в правой части системы суммарные силу и момент, вызванные ветровым и волновым воздействием на судно. Учтём также, что угол перекадки руля δ зависит от рассогласования между заданными и фактическими значениями параметров φ , ω , и η , то есть

$$\delta = \gamma_\varphi (\varphi_0 - \varphi) + \gamma_\omega (\omega_0 - \omega) + \gamma_\eta (\eta_0 - \eta),$$

и дополним систему (1) двумя очевидными кинематическими соотношениями

$$\begin{cases} m_{22}\dot{\beta} + \bar{n}_y^\beta \beta - m_{26}\dot{\omega} - \bar{n}_y^\omega \omega + \bar{n}_y^\delta (\gamma_\varphi (\varphi_0 - \varphi) + \gamma_\omega (\omega_0 - \omega) + \gamma_\eta (\eta_0 - \eta)) = n_b; \\ -m_{26}\dot{\beta} - \bar{m}_z^\beta \beta + m_{66}\dot{\omega} - \bar{m}_z^\omega \omega + \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta (\gamma_\varphi (\varphi_0 - \varphi) + \gamma_\omega (\omega_0 - \omega) + \gamma_\eta (\eta_0 - \eta)) = m_b; \\ \omega = \dot{\varphi}; \\ \varphi - \beta = \dot{\eta}. \end{cases} \quad (2)$$

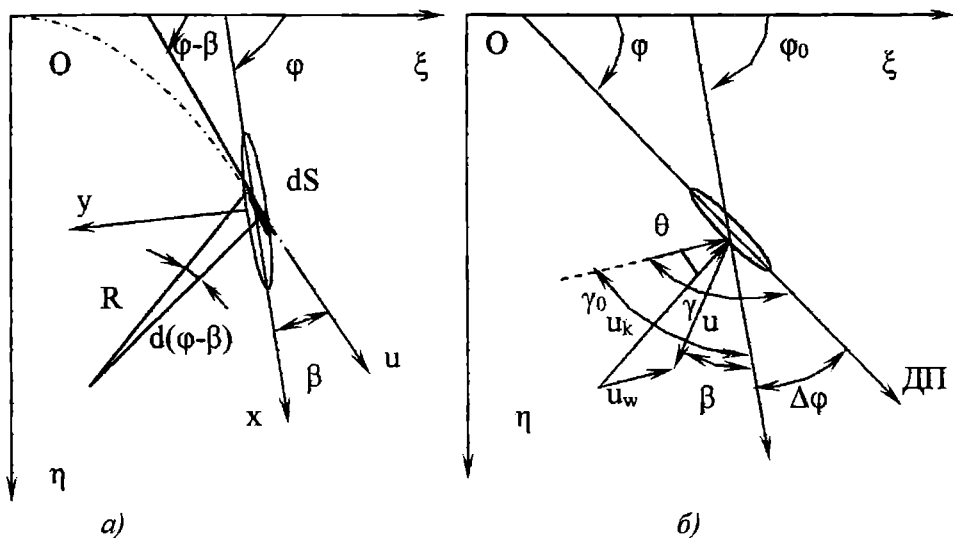


Рис.1. а). Система координат и направления отсчёта характерных углов; б). Схема действия ветровых нагрузок на судно: φ_0 – заданный курс; φ – истинный курс; $\Delta\varphi$ – угол рыскания; β – угол дрейфа; γ_0 и γ – углы между направлением действия ветра и заданным и истинным курсами, соответственно; u , u_w и u_k – скорости судна, истинного и вымпельного ветра, соответственно; θ – угол между истинным и вымпельным ветром; dS – приращение перемещения; R – радиус кривизны траектории

Ясно, что для точного удержания судна на курсе φ_0 результирующая скорость рыскания ω_0 и боковое смещение η_0 судна должны быть равны нулю. Оценить величину $2B_n$ относительной ширины ПДС удобно, вычислив для заданных характеристик ветра и волнения, действующих на судно, обеспеченность этой величины, то есть вероятность того, что судно выйдет за пределы полосы относительной ширины $2B_n$. Математическая модель такого события описывается совокупностью неравенств (3). Каждое из этих неравенств будем обозначать буквой A с индексом $i=1, 2, 3, 4$ в порядке их перечисления

$$\begin{aligned}
 A_1 : & \left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \sin \varphi + \eta + \frac{B}{2L} \cos \varphi \geq B_n, \quad \varphi \geq 0; \quad \eta \geq 0; \\
 A_2 : & \left(-\frac{1}{2} + \bar{x}_f \right) \sin \varphi + \eta - \frac{B}{2L} \cos \varphi \leq -B_n, \quad \varphi \geq 0; \quad \eta < 0; \\
 A_3 : & \left(-\frac{1}{2} + \bar{x}_f \right) \sin \varphi + \eta + \frac{B}{2L} \cos \varphi \geq B_n, \quad \varphi < 0; \quad \eta \geq 0; \\
 A_4 : & \left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \sin \varphi + \eta - \frac{B}{2L} \cos \varphi \leq -B_n, \quad \varphi < 0; \quad \eta < 0.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Область изменения параметров

$$|\beta| \leq 0,2; \quad |\varphi| \leq 0,4; \quad |\omega| \leq 0,1; \quad |\eta| \leq 0,1 \tag{4}$$

Поскольку эти неравенства исчерпывают все возможные комбинации областей изменения пар значений φ и η , то есть образуют полную группу событий, то событие “безусловного выхода судна за границы канала” равно $A = \bigcup_{i=1}^4 A_i$. Учитывая, что

$$\begin{cases} \eta = |\eta|, & \eta \geq 0, \\ \eta = -|\eta|, & \eta < 0, \end{cases}$$

можно записать

$$\begin{aligned}
 A_1 : & \left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \sin \varphi + |\eta| + \frac{B}{2L} \cos \varphi \geq B_n, \quad \varphi \geq 0; \quad \eta \geq 0, \\
 A_2 : & -\left(\left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \sin \varphi + |\eta| + \frac{B}{2L} \cos \varphi \right) \leq -B_n, \quad \varphi \geq 0; \quad \eta < 0.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Нетрудно показать, что если происходит событие A_1 , то также происходит событие A_2 и наоборот. Поэтому, чтобы удовлетворить пересечению этих событий, достаточно удовлетворить одному из них, например A_1

$$A_1 \cap A_2 : \left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \sin \varphi + |\eta| + \frac{B}{2L} \cos \varphi \geq B_n, \quad \varphi > 0; \quad (6)$$

Аналогично, для второй пары событий A_3 и A_4 из неравенств (3) получим

$$A_3 : -\left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \sin \varphi + |\eta| + \frac{B}{2L} \cos \varphi \geq B_n, \quad \varphi < 0; \quad \eta \geq 0, \quad (7)$$

$$A_4 : \left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \sin \varphi - |\eta| - \frac{B}{2L} \cos \varphi \leq -B_n, \quad \varphi < 0; \quad \eta < 0,$$

и

$$A_3 \cap A_4 : -\left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \sin \varphi + |\eta| + \frac{B}{2L} \cos \varphi \geq B_n, \quad \varphi < 0. \quad (8)$$

Из (6) и (8) следует, что событию A , которое влечёт все события (3), соответствует неравенство

$$A = \bigcap_{i=1}^4 A_i = \left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \sin |\varphi| + |\eta| + \frac{B}{2L} \cos |\varphi| \geq B_n. \quad (9)$$

Учитывая, что при малых φ , $\sin |\varphi| \approx |\varphi|$, имеем

$$A = \left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) |\varphi| + |\eta| + \frac{B}{2L} \geq B_n. \quad (10)$$

Вероятность события A можно найти, применив теорию стохастических дифференциальных уравнений. Решением системы дифференциальных уравнений типа (2) согласно теореме Дуба [3, 4] является многомерный марковский процесс, компоненты которого полностью описывают динамическое состояние системы, а совместная плотность распределения вероятности этого процесса удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова. Прямо это положение можно применять лишь в том случае, когда динамический процесс описывается системой стохастических дифференциальных уравнений, то есть системой, имеющей в качестве входного процесса белый шум в строгом смысле. Белый шум, как безынерционный процесс, является математической моделью предельного протекания слабо инерционного процесса, поэтому реальные системы достаточно точно нельзя описать стохастическими дифференциальными уравнениями. Однако существует метод формирующих фильтров [3, 4, 5], позволяющий преобразовать систему дифференциальных уравнений со случайными возмущениями к системе стохастических дифференциальных уравнений. Суть метода формирующих фильтров заключается в следующем. Пусть поведение случайного векторного процесса $\bar{\mathcal{F}}(t) = (\mathcal{F}_1(t) \dots \mathcal{F}_n(t))$ описывается системой линейных дифференциальных уравнений

$$L_j(\mathcal{G}_i^{(s_i)}, \mathcal{G}_i^{(s_i-1)}, \mathcal{G}_i^{(s_i-2)}, \dots, \ddot{\mathcal{G}}_i, \dot{\mathcal{G}}_i, \mathcal{G}_i, t) = \zeta_j(t), \quad i, j = 1 \div h. \quad (11)$$

или в операторной форме

$$\Theta_i = \sum_{j=1}^h W^{\zeta_j \rightarrow \mathcal{G}_i} Z_j, \quad i = 1 \div h. \quad (12)$$

Согласно теории случайных стационарных процессов [3] спектральная плотность $S_{\mathcal{G}_i}$ неизвестной функции $\mathcal{G}_i(t)$ равна

$$S_{\mathcal{G}_i} = \sum_{j=1}^h |W^{\zeta_j \rightarrow \mathcal{G}_i}|^2 S_{\zeta_j}, \quad (13)$$

где $W^{\zeta_j \rightarrow \mathcal{G}_i}$ – передаточные функции, которые являются дробно-рациональными функциями в силу линейности системы уравнений. Аппроксимируя спектральные плотности входящих процессов $S_{\zeta_j}(\sigma)$ дробно-рациональными функциями типа

$$\frac{P_{m_j}(\sigma)}{Q_{n_j}(\sigma)}, \quad m_j \leq n_j$$

и учитывая тот факт, что спектральная плотность белого шума $S_v(\sigma)$ равна $\frac{1}{2\pi}$, получим представление спектральной плотности искомых функций в виде

$$S_{\mathcal{G}_i} = S_v \sum_{j=1}^h \left[|W^{\zeta_j \rightarrow \mathcal{G}_i}|^2 \left(2\pi \frac{P_{m_j}}{Q_{n_j}} \right) \right]. \quad (14)$$

Множитель $|W^{v \rightarrow \mathcal{G}_i}|^2 = \sum_{j=1}^h \left[|W^{\zeta_j \rightarrow \mathcal{G}_i}|^2 \left(2\pi \frac{P_{m_j}}{Q_{n_j}} \right) \right]$ – это квадрат

модуля передаточной функции преобразования белого шума $v(t)$ в искомую функцию $\mathcal{G}_i(t)$. Следовательно, $\mathcal{G}_i(t)$ есть решение стохастического дифференциального уравнения с входящим белым шумом. Так как все слагаемые этого выражения суть дробно-рациональные функции, то и $|W^{v \rightarrow \mathcal{G}_i}|^2$ есть дробно-рациональная функция

вида $\frac{P_{m_i}(\sigma)}{Q_{n_i}(\sigma)}$. Это означает, что функции $\mathcal{G}_i(t)$ являются решением

системы линейных дифференциальных уравнений вида

$$\sum_{s=0}^{n_i} a_{si} g_i^{(s)} = \sum_{r=0}^{m_i} b_{ri} v^{(r)}, \quad i = 1 \div h. \quad (15)$$

Для преобразования системы уравнений (15) к канонической форме Коши – системе уравнений первого порядка, не содержащих производных входного процесса $v(t)$, введём новые переменные

$$z_{i1} = u_i - q_{i0} v, \quad z_{il+1} = \dot{z}_{il} - q_{il} v, \quad l = 1 \div n_i - 1, \quad i = 1 \div h. \quad (16)$$

Величины q_{il} для системы уравнений с постоянными коэффициентами определяются по формулам

$$q_{i0} = q_{i1} = \dots = q_{i(n_i-m_i-1)} = 0, \quad q_{i(n_i-m_i)} = \frac{b_{m_i}}{a_{n_i}},$$

$$q_{il} = \frac{\left(b_{n_i-l} - \sum_{p=n_i-m_i}^{l-1} a_{n_i-l+p} q_p \right)}{a_{n_i}}, \quad l = (n_i - m_i) + 1 \div n_i. \quad (17)$$

В итоге система (15) преобразуется к виду

$$\dot{z}_j(t) = L_j [z_i(t), t] + q_j v, \quad j, i = 1 \div \hat{h}, \quad \hat{h} = \sum_{i=1}^h n_i - h \quad (18)$$

где $L_j [z_i(t), t]$ – линейные уравнения относительно $z_i(t)$;

q_j – постоянные коэффициенты.

Для выполнения подобного преобразования системы (2) необходимо изучить структуру динамических процессов $n_a(t)$ и $m_a(t)$ и, в случае необходимости, используя метод формирующих фильтров, представить их в виде решений системы стохастических дифференциальных уравнений, на вход которых подан процесс белого шума.

Рассмотрим возмущающие силу $F(t)$ и момент $M(t)$ волновой природы при поперечно горизонтальной качке и рыскании судна на нерегулярном волнении. Пусть $\Phi(x, y, z, t)$ – потенциал скоростей набегающего волнения и $\xi(x, y, t)$ – уравнение волновой поверхности. Согласно теории стационарных случайных процессов [3] спектральная плотность волновых возмущающей силы и момента определяются так

$$S_F = |W^{\xi \rightarrow \Phi}|^2 |W^{\Phi \rightarrow F}|^2 S_\xi; \quad S_M = |W^{\xi \rightarrow \Phi}|^2 |W^{\Phi \rightarrow M}|^2 S_\xi, \quad (19)$$

где $W^{\Phi \rightarrow F, M}$ – передаточные функции линейного преобразования потенциала набегающего волнения $\Phi(x, y, z, t)$ в возмущающие силу $F(t)$ и момент $M(t)$, соответственно;

$W^{\xi \rightarrow \Phi}$ – передаточная функция линейного преобразования волновой поверхности $\xi(x, y, t)$ в потенциал набегающего волнения $\Phi(x, y, z, t)$;

S_{ξ} – спектральная плотность волнения.

Представим S_F и S_M в виде дробно-рациональных функций, аппроксимируя каждый из множителей (19) дробно-рациональными выражениями. Рассмотрим спектральную плотность волнения. Согласно [6] S_{ξ} является дробно-рациональной функцией частоты

$$S_{\xi} = D\alpha \sum_{j=0}^1 \frac{1}{\alpha^2 + \left[(\sigma + (-1)^j \beta) \right]^2},$$

где D – дисперсия процесса волнения;

σ – частота волнения;

α и β постоянные параметры, определяемые характером волнения.

Таким образом, S_{ξ} можно представить в виде произведения квадрата модуля передаточной функции $W^{v \rightarrow \xi}$ преобразования белого шума $v(t)$ в волнение $\xi(x, y, t)$ на спектральную плотность белого

шума $S_v = \frac{I}{2\pi}$, то есть

$$S_{\xi} = \left| W^{v \rightarrow \xi} \right|^2 \frac{1}{2\pi},$$

$$\text{где } \left| W^{v \rightarrow \xi} \right|^2 = 4\pi D\alpha \frac{\alpha^2 + \beta^2 + \sigma^2}{\prod_{j=0}^1 \left[\alpha^2 + \left(\sigma + (-1)^j \beta \right)^2 \right]}, \quad \alpha, \beta > 0. \quad (20)$$

Следовательно, $\left| W^{v \rightarrow \xi} \right|^2$ является дробно-рациональной функцией.

Учитывая известное соотношение линейной теории поверхностных волн

$\xi = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t}$ и выражение потенциала скоростей жидкости для

прогрессивных волн на глубокой воде, получим

$$\left| W^{\xi \rightarrow \Phi} \right|^2 = \left(\frac{g}{\sigma} \right)^2. \quad (21)$$

Передаточные функции $W^{\Phi \rightarrow F, M}$ можно определить по методике, предложенной в [2]. Дробно-рациональная аппроксимация квадрата

модуля передаточной функции, полученная методом наименьших квадратов, имеет вид

$$|W^{\xi \rightarrow M}|^2 \approx \frac{P_4^m}{Q_8^m} = \frac{a_m \sigma^4 + b_m \sigma^2 + c_m}{(\sigma^4 + d_m \sigma^2 + e_m)(\sigma^4 + f_m)}, \quad (22)$$

где $a_m, b_m, c_m, d_m, e_m, f_m$ – оптимизируемые параметры. Отсюда, разлагая $|W^{\xi \rightarrow \Phi}|^2$ в произведение простых множителей, несложно найти выражение самой передаточной функции

$$W^{\xi \rightarrow M} = \frac{P_2^m(i\sigma)}{Q_4^m(i\sigma)} = \frac{(i\sigma)^2 + 2y_p(i\sigma) + (x_p^2 + y_p^2)}{(i\sigma)^4 + (y_{q1} + y_{q2})(i\sigma)^3 + \left(\sum_{j=1}^2 (x_{qj} + y_{qj}) + y_{q1}y_{q2}\right)(i\sigma)^2 + \left(\sum_{j \neq l}^{12} (x_{qj} + y_{qj})y_{ql}\right)(i\sigma) + \prod_{j=1}^2 (x_{qj}^2 + y_{qj}^2)}, \quad (23)$$

где $\pm(x_p \pm iy_p), \mp(x_p \pm iy_p)$ – корни числителя (22), а $(\pm x_{q1} \pm iy_{q1}), (\mp x_{q1} \pm iy_{q1}), \pm(x_{q2} \pm iy_{q2})$ и $\mp(x_{q2} \pm iy_{q2})$ – корни знаменателя (22).

Разлагая $|W^{v \rightarrow \xi}|^2$ в произведение простых множителей, получим выражение передаточной функции $W^{v \rightarrow \xi}$ в виде

$$W^{v \rightarrow \xi} = \frac{2\sqrt{\pi D \alpha} (i\sigma + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2})}{(i\sigma)^2 + 2\alpha(i\sigma) + (\alpha^2 + \beta^2)}. \quad (24)$$

Умножив $W^{v \rightarrow \xi}$ на $W^{\xi \rightarrow M}$, найдём передаточную функцию $W^{v \rightarrow M}$ преобразования белого шума в возмущающий момент

$$W^{v \rightarrow M} = \frac{2\sqrt{\pi D \alpha} \cdot \sum_{j=0}^3 a_{mj} (i\sigma)^j}{\sum_{i=0}^6 b_{mj} (i\sigma)^i}, \quad (25)$$

где коэффициенты a_{mj} и b_{mj} получаются в результате алгебраического преобразования произведения передаточных функций $W^{v \rightarrow \xi}$ и $W^{\xi \rightarrow M}$. Квадрат модуля передаточной функции преобразования волнения в возмущающую силу аппроксимирован выражением

$$|W^{\xi \rightarrow F}|^2 \approx \frac{P_o^f}{Q_4^f} = \frac{a_f}{(\sigma^4 + b_f \sigma^2 + c_f)}, \quad (26)$$

где a_f , b_f и c_f – оптимизируемые параметры. Аналогично тому, как была найдена функция $W^{v \rightarrow M}$, найдём передаточную функцию $W^{v \rightarrow F}$ преобразования белого шума в возмущающую силу

$$W^{v \rightarrow F} = \frac{2\sqrt{\pi D \alpha} \cdot \sum_{j=0}^I a_{fj} (i\sigma)^j}{\sum_{l=0}^4 b_{fl} (i\sigma)^l}, \quad (27)$$

где коэффициенты a_{fj} и b_{fl} определяются в результате алгебраического преобразования произведения $W^{v \rightarrow \xi}$ на $W^{\xi \rightarrow F}$.

Рассмотрим теперь возмущающие силу и момент, действующие на надводную часть судна от ветра. Вызванную ветром поперечную силу и её момент можно представить в виде

$$F_w = \frac{\rho_w |\vec{u}_k|^2 S_y C_{fy}}{2}; \quad M_w = \frac{\rho_w |\vec{u}_k|^2 S_y L C_{mz}}{2}, \quad (28)$$

где $\vec{u}_k = \vec{u}_w - \vec{u}$ – вымпельная скорость ветра;

\vec{u}_w – истинная скорость ветра;

C_{fy}, C_{mz} – коэффициенты аэродинамического сопротивления, зависящие от угла $\tilde{\gamma}$ между ДП судна и направлением вектора вымпельной скорости \vec{u}_k .

Из рис. 1,б видно, что

$$\tilde{\gamma} = \gamma_0 + \varphi_0 - \varphi - \theta,$$

где θ – угол между векторами истинной и вымпельной скоростей ветра;

φ_0 – генеральное направление движения судна;

φ – курсовой угол;

$\varphi_0 - \varphi = \Delta\varphi$ угол рыскания судна, полагаемый малой величиной;

γ_0 – угол между направлением генерального курса и направлением вектора \vec{u}_w .

Величину вымпельной скорости ветра можно определить по теореме косинусов

$$u_k^2 = u_w^2 + u^2 - 2u_w u \cos(\pi - \gamma_0 + \beta) \approx u_w^2 + u^2 + 2u_w u \cos \gamma_0.$$

Угол θ определяется по теореме синусов

$$\theta = \arcsin\left(\frac{u \sin(\pi - \gamma_0 + \beta)}{u_k}\right) \approx \arcsin\left(\frac{u \sin \gamma_0}{u_k}\right).$$

Коэффициенты C_{fy} и C_{mz} рассчитываются по эмпирическим формулам [8].

$$C_{fy} = \frac{C_{yn} LH \sum_i l_i h_i + \tilde{C}_{y6} S_{y6}}{S_y}; \quad C_{mz} = \frac{C_{m1} LH \sum_i l_i h_i + \tilde{C}_{m6} S_{y6}}{S_y}, \quad (29)$$

где C_{yn} , \tilde{C}_{y6} , C_{m1} , \tilde{C}_{m6} – коэффициенты аэродинамического сопротивления надстроек и голого борта судна. Поскольку коэффициенты C_{fy} , C_{mz} от курсового угла не зависят, положим $\varphi_0 = 0$, и обозначим $\tilde{\gamma}_0 = \gamma_0 - \theta$. Тогда из $\varphi_0 - \varphi = \Delta\varphi$ следует, что $|\varphi| = |\Delta\varphi| \ll 1$ и $\tilde{\gamma} = \tilde{\gamma}_0 - \varphi$. Подставляя выражение для $\tilde{\gamma}$ в формулы определения C_{fy} , C_{mz} из [8] находим

$$\begin{aligned} C_{yn} &= (C_{y1} \sin \tilde{\gamma}_0 + C_{y2} \sin 3\tilde{\gamma}_0) - (C_{y1} \cos \tilde{\gamma}_0 + 3C_{y2} \cos 3\tilde{\gamma}_0) \varphi, \\ \tilde{C}_{y6} &= C_{y6} + \Delta C_{y6}; \\ C_{y6} &= (C_{y3} \sin \tilde{\gamma}_0 + C_{y4} \sin 3\tilde{\gamma}_0) - (C_{y3} \cos \tilde{\gamma}_0 + 3C_{y4} \cos 3\tilde{\gamma}_0) \varphi, \\ \Delta C_{y6} &= C_{y5} + (C_{y6} \cos 2\tilde{\gamma}_0 + C_{y7} \cos 4\tilde{\gamma}_0) - 2(C_{y6} \sin 2\tilde{\gamma}_0 + 2C_{y7} \sin 4\tilde{\gamma}_0) \varphi, \\ C_{m1} &= (C_{m1} \sin \tilde{\gamma}_0 + C_{m2} \sin 2\tilde{\gamma}_0) - (C_{m1} \cos \tilde{\gamma}_0 + 2C_{m2} \cos 2\tilde{\gamma}_0) \varphi, \\ \tilde{C}_{m6} &= C_{m6} + \Delta C_{m6}; \\ C_{m6} &= (C_{m3} \sin 2\tilde{\gamma}_0 + C_{m4} \sin 4\tilde{\gamma}_0 \pm C_{m5} \sin 1,5\tilde{\gamma}_0) - (2C_{y3} \cos 2\tilde{\gamma}_0 + 4C_{y4} \cos 4\tilde{\gamma}_0 \pm \\ &\quad \pm 1,5C_{m5} \cos 1,5\tilde{\gamma}_0) \varphi, \\ \Delta C_{m6} &= (C_{m6} + C_{m7} \cos 2\tilde{\gamma}_0 + C_{m8} \cos 4\tilde{\gamma}_0 + C_{m9} \sin 4\tilde{\gamma}_0) - (2C_{m7} \sin 2\tilde{\gamma}_0 + \\ &\quad + 4C_{m8} \sin 4\tilde{\gamma}_0 + 4C_{m9} \cos 4\tilde{\gamma}_0) \varphi. \end{aligned} \quad (30)$$

Численные значения коэффициентов правых частей равенств даны в [8]. Подставляя коэффициенты из (30) в (29) и вводя новые обозначения для постоянных, получим выражения для C_{fy} , C_{mz}

$$C_{fy} = C_{f1} + C_{f2} \varphi; \quad C_{mz} = C_{m1} + C_{m2} \varphi. \quad (31)$$

Мгновенные значения вымпельной скорости ветра можно представить в виде суммы

$$\vec{u}_k = \vec{u}_{cp} + \vec{u}_n,$$

где \vec{u}_{cp} – среднее значение скорости ветра (математическое ожидание);

\ddot{u}_n — её пульсационная составляющая (центрированный процесс).

Полагая, что направление скорости ветра изменяется незначительно, можно, фиксируя направление ветра, среднюю и пульсационную скорости ветра рассматривать как скалярные величины u_{cp} и u_n . Подставим выражения для C_{fy} , C_{mz} и u_w в (28). Получим выражения для силы F_w и момента M_w

$$F_w = \rho_w u_{cp}^2 S_y \left(\frac{C_{f1}}{2} + C_{f2} \varphi \right) + \rho_w u_{cp} u_n S_y \left(\frac{C_{f1}}{2} + C_{f2} \varphi \right); \quad (32)$$

$$M_w = \rho_w u_{cp}^2 S_y L \left(\frac{C_{m1}}{2} + C_{m2} \varphi \right) + \rho_w u_{cp} u_n S_y L \left(\frac{C_{m1}}{2} + C_{m2} \varphi \right).$$

Так как u_{cp} является детерминированной величиной, то из (32) следует, что сила и момент ветрового воздействия складываются из детерминированной и случайной составляющих. Следовательно, решение исходной задачи (2) можно представить в виде композиции решений детерминированной и вероятностной задач. Моделью детерминированной задачи является система (2) с входящими процессами, которые описываются первыми слагаемыми (32) и с начальными значениями φ_0 ,

β_0 , и ω_0 . Случайные процессы φ и β , также как и скорость ветра, можно представить в виде суммы детерминированной и случайной компонент, то есть $\varphi = \varphi_d + \varphi_c$ и $\beta = \beta_d + \beta_c$, где φ_d и β_d определяются в результате решения детерминированной задачи. Выбирая коэффициенты γ_φ и γ_ω регулировки авторулевого такими, чтобы обеспечить устойчивое движение судна, после стабилизации направления его перемещения параметры φ_d и β_d можно считать постоянными, то есть эти величины будут близкими по значению математическим ожиданиям параметров φ и β , а φ_c и β_c будут центрированными процессами. Моделью вероятностной задачи является система (2), входящие процессы, в которой определяются суммированием случайных возмущающих силы и момента от набегающего волнения со случайными составляющими силы и момента ветрового воздействия на судно. Случайные составляющие силы F_u и момента M_u ветрового воздействия на судно — это вторые слагаемые в формулах (32). Они являются билинейными относительно случайных функций $u_n(t)$ и $\varphi(t)$. Используя представление $\varphi = \varphi_d + \varphi_c$ и учитывая, что φ_d представляет собой детерминированную составляющую, случайные составляющие силы и момента ветрового воздействия на судно можно линеаризовать, полагая

$$F_u = \rho_w u_{cp} u_n S_y \left(\frac{C_{f1}}{2} + C_{f2} \varphi_d \right) = \Theta_1 u_n; \quad (33)$$

$$M_u = \rho_w u_{cp} u_n S_y L \left(\frac{C_{m1}}{2} + C_{m2} \varphi_d \right) = \Theta_2 u_n.$$

Так как случайные составляющие аэродинамических силы и момента пропорциональны случайной (то есть пульсационной) составляющей скорости ветра, то их спектральные плотности также пропорциональны спектральной плотности пульсационной составляющей скорости ветра [7]

$$S_u = \frac{4kL_T u_{cp} \tilde{\omega}}{(1 + \tilde{\omega}^2)^{4/3}}, \quad (34)$$

где k – коэффициент сопротивления поверхности моря, м.;

L_T – линейный размер, характеризующий турбулентность воздушного потока, принятый равным 1800 метров;

ω – частота пульсаций скорости ветра;

$\tilde{\omega} = \frac{L_T \omega}{2\pi u_{cp}}$ – относительная частота.

Спектральные плотности аэродинамических силы и момента имеют вид

$$S_{F_w} = \rho_w u_{cp} S_y \left(\frac{C_{f1}}{2} + C_{f2} \varphi_d \right) S_u, \quad (35)$$

$$S_{M_w} = \rho_w u_{cp} S_y L \left(\frac{C_{m1}}{2} + C_{m2} \varphi_d \right) S_u.$$

Спектральная плотность пульсационной составляющей скорости ветра аппроксимируется дробно-рациональной функцией

$$S_u \approx \frac{P_u^2}{Q_u^4} = \frac{4kL_T a_u \tilde{\omega}^2}{(\tilde{\omega}^4 + b_u)}, \quad (36)$$

где a_u и b_u – оптимизируемые параметры. Очевидно, что пульсационную составляющую скорости ветра можно считать линейным преобразованием белого шума единичной интенсивности с передаточной функцией $W^{v \rightarrow u_n}$, квадрат модуля которой равен

$$|W^{v \rightarrow u_n}|^2 = \frac{8\pi k L_T a_u \tilde{\omega}^2}{(\tilde{\omega}^4 + b_u)}. \quad (37)$$

Следовательно, силу F_u и момент M_u можно рассматривать как линейные преобразования белого шума единичной интенсивности с передаточными функциями, квадраты модулей которых равны

$$\begin{aligned} \left| W^{v \rightarrow F_u} \right|^2 &= \rho_w u_{cp} S_y \left(\frac{C_{f1}}{2} + C_{f2} \varphi_d \right) \left| W^{v \rightarrow u_n} \right|^2, \\ \left| W^{v \rightarrow M_u} \right|^2 &= \rho_w u_{cp} S_y L \left(\frac{C_{m1}}{2} + C_{m2} \varphi_d \right) \left| W^{v \rightarrow u_n} \right|^2. \end{aligned} \quad (38)$$

Как и для гидродинамических сил, получим передаточные функции $W^{v \rightarrow u_n}$, $W^{v \rightarrow F_u}$ и $W^{v \rightarrow M_u}$ в виде

$$\begin{aligned} W^{v \rightarrow u_n} &= \frac{\sqrt{8\pi k L_T \tilde{a}_u(i\tilde{\omega})}}{2} \sum_{j=0} \tilde{b}_{uj}(i\tilde{\omega})^j, \\ W^{v \rightarrow F_u} &= \Theta_1 W^{v \rightarrow u_n}, \\ W^{v \rightarrow M_u} &= \Theta_2 W^{v \rightarrow u_n}. \end{aligned} \quad (39)$$

Согласовав временные и линейные масштабы, принятые для аэродинамических силы и момента с аналогичными масштабами, принятыми для гидродинамических силы и момента, передаточные функции возмущающих сил и моментов $W^{v \rightarrow F_u}$ и $W^{v \rightarrow M_u}$ выпишем в виде

$$W^{v \rightarrow F_u} = \frac{\Theta_1 a_{u_n}(i\sigma)}{\sum_{j=0}^2 b_{u_n j}(i\sigma)^j}, \quad W^{v \rightarrow M_u} = \frac{\Theta_2 a_{u_n}(i\sigma)}{\sum_{j=0}^2 b_{u_n j}(i\sigma)^j}, \quad (40)$$

где коэффициенты a_{u_n} и b_{u_n} определяются в результате алгебраических преобразований $W^{v \rightarrow u_n}$.

Таким образом, используя (25), (27) и (40), систему уравнений управляемости судна (2) можно представить в виде системы стохастических дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases}
 m_{22}(\dot{\varphi} - \dot{\eta}) + \bar{n}_y^\beta (\varphi - \eta) - m_{26}\ddot{\varphi} - \bar{n}_y^\alpha \dot{\varphi} + \bar{n}_y^\delta (\gamma_\varphi \varphi + \gamma_\omega \dot{\varphi} + \gamma_\eta \eta) - Q_1 u_n - F = 0, \\
 -m_{26}(\dot{\varphi} - \dot{\eta}) - \bar{m}_z^\beta (\varphi - \eta) + m_{66}\ddot{\varphi} - \bar{m}_z^\alpha \dot{\varphi} + \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta (\gamma_\varphi \varphi + \gamma_\omega \dot{\varphi} + \gamma_\eta \eta) - Q_2 u_n - M = 0, \\
 \sum_{j=0}^6 b_{m_j} M^{(j)} = 2\sqrt{\pi D \alpha} \sum_{l=0}^3 a_{ml} v^{(l)}; \\
 \sum_{j=0}^4 b_{f_j} F^{(j)} = 2\sqrt{\pi D \alpha} \sum_{l=0}^1 a_{fl} v^{(l)}; \\
 \sum_{j=0}^2 b_{u_j} u_n^{(j)} = a_u v.
 \end{cases} \quad (41)$$

Здесь учтено, что $\beta = \varphi - \eta$.

Как было отмечено выше, решение этой системы описывает многомерный марковский процесс $\bar{x}(t)$, совместная плотность распределения вероятности которого удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова

$$\frac{\partial}{\partial t} p(\bar{x}, t) = - \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} [\alpha_j(\bar{x}, t) p(\bar{x}, t)] + \frac{1}{2} \sum_{g,h} \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_i} [\beta_{gh}(\bar{x}, t) p(\bar{x}, t)], \quad (42)$$

где α_i и β_{gh} - коэффициенты сноса и диффузии процесса $\bar{x}(t)$, значения которых определяются по коэффициентам системы (41). Белый шум является нормальным процессом, поэтому процесс $\bar{x}(t)$, как результат линейного преобразования белого шума, имеет нормальную плотность распределения

$$p(\bar{x}, t) = \left[\prod_{i=1}^n \sigma_i \sqrt{(2\pi)^n D} \right]^{-1} \times \exp \left\{ - \frac{1}{2D} \sum_{i,j=1}^n D_{ij} \frac{z_i - M_i}{\sigma_i} + \frac{z_j - M_j}{\sigma_j} \right\}, \quad (43)$$

где M_i и σ_i - математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение процесса $x_i(t)$;

D - определитель корреляционной матрицы процесса $\bar{x}(t)$;

$\|D_{ij}\|$ - матрица алгебраических дополнений элементов корреляционной матрицы процесса $\bar{x}(t)$.

Проинтегрировав плотность распределения вероятности $p(\bar{x}, t)$ по переменным, введённым при преобразовании системы (2) в каноническую

форму (41), получим совместную плотность распределения вероятности $\tilde{p}(\bar{x}, t)$ параметров движения судна. Расчёт распределения вероятности $\tilde{p}(\bar{x}, t)$ связан с необходимостью преодоления серьёзных технических трудностей при вычислении интеграла высокой кратности. Однако верхнюю оценку вероятности события (10) проще получить с помощью неравенства Чебышева

$$P\left(\left|\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)\varphi+|\eta+\frac{B}{2L}\right|\geq B_n\right) < \frac{M\left(\left(\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)\varphi+|\eta+\frac{B}{2L}\right)^2\right)}{B_n^2} = \tag{44}$$

$$= \frac{\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)^2 M(\varphi^2) + 2\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)M(\eta|\varphi) + M(\eta^2) + \left(\frac{B}{2L}\right)^2 + \frac{B}{L}\left[\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)M(|\varphi|) + M(|\eta|)\right]}{B_n^2}$$

При установившемся движении судна под действием стационарных случайных возмущений пульсации параметров движения судна будут происходить относительно соответствующих постоянных математических ожиданий. Значения математических ожиданий параметров движения судна, как было отмечено выше, можно получить, решая детерминированную задачу движения судна под действием математических ожиданий внешних возмущений. В этом случае φ и η можно считать центрированными случайными величинами. При $\bar{x}_f \leq \frac{1}{2}$, что выполняется для современных судов, справедливо неравенство

$$\left|\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)\varphi+\eta+\frac{B}{2L}\right| \leq \left|\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)|\varphi|+|\eta|+\frac{B}{2L}\right|,$$

поэтому достаточно оценить вероятность события

$$\left|\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)\varphi+\eta+\frac{B}{2L}\right| \geq B_n$$

$$P\left(\left|\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)\varphi+\eta+\frac{B}{2L}\right|\geq B_n\right) < \frac{\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)^2 M(\varphi^2) + 2\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)M(\eta\varphi) + M(\eta^2)}{B_n^2} + \tag{45}$$

$$+ \frac{\left(\frac{B}{2L}\right)^2 + \frac{B}{L}\left[\left(\frac{1}{2}-\bar{x}_f\right)M(|\varphi|) + M(|\eta|)\right]}{B_n^2}$$

Если математические ожидания величин φ и η равны нулю, то по определению моментов второго порядка имеем

$$M(\varphi^2) = D(\varphi), \quad M(\eta^2) = D(\eta) \quad \text{и} \quad M(\varphi\eta) = K_{\varphi\eta}.$$

Так как

$$M(\varphi\eta) \leq \sqrt{M(\varphi^2)M(\eta^2)} = \sigma_\varphi \sigma_\eta,$$

где $\sigma_\varphi = \sqrt{D(\varphi)}$, $\sigma_\eta = \sqrt{D(\eta)}$, то неравенство Чебышева (45) можно записать в виде

$$P\left(\left|\left(\frac{1}{2}\bar{x}_f\right)\varphi + \eta + \frac{B}{2L}\right| \geq B_n\right) < \frac{\left(\frac{1}{2}\bar{x}_f\right)^2 \sigma_\varphi^2 + 2\left(\frac{1}{2}\bar{x}_f\right)\sigma_\varphi\sigma_\eta + \sigma_\eta^2}{B_n^2} + \left(\frac{B}{2L}\right)^2 =$$

$$= \left(\frac{\left(\frac{1}{2}\bar{x}_f\right)\sigma_\varphi + \sigma_\eta}{B_n}\right)^2 + \left(\frac{B}{2L}\right)^2. \quad (46)$$

Значения дисперсий D_φ , D_η , и, следовательно, среднеквадратические отклонения σ_φ и σ_η можно получить из системы (41), записав её в операторной форме

$$\begin{cases} \left(m_{22}(i\sigma)^2 + \bar{n}_y^\beta(i\sigma) + \bar{n}_y^\delta\gamma_\eta\right) H \left[m_{2\delta}(i\sigma)^2 - (m_{22}\bar{n}_y^\sigma + \bar{n}_y^\delta\gamma_\omega)(i\sigma) + (\bar{n}_y^\beta + \bar{n}_y^\delta\gamma_\varphi)\right] \Phi = \\ \quad = \frac{2\sqrt{\pi}\Delta\alpha \sum_{l=0}^1 a_{f1}(i\sigma)^l}{\sum_{j=0}^4 b_{fj}(i\sigma)^j} + \frac{Q_1 a_u(i\sigma)}{\sum_{j=0}^2 b_{uj}(i\sigma)^j}; \\ \left(m_{2\delta}(i\sigma)^2 + \bar{m}_z^\beta(i\sigma) + \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta\gamma_\eta\right) H \left[m_{2\delta}(i\sigma)^2 - (m_{2\delta}\bar{m}_z^\sigma + \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta\gamma_\omega)(i\sigma) - (\bar{m}_z^\beta + \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta\gamma_\varphi)\right] \Phi = \\ \quad = \frac{2\sqrt{\pi}\Delta\alpha \sum_{l=0}^3 a_{m1}(i\sigma)^l}{\sum_{j=0}^6 b_{mj}(i\sigma)^j} + \frac{Q_2 a_u(i\sigma)}{\sum_{j=0}^2 b_{uj}(i\sigma)^j}, \end{cases} \quad (47)$$

где H и Φ – образы преобразования Фурье функций $\eta(t)$ и $\varphi(t)$ соответственно. Разрешив систему (47) относительно H и Φ получим

$$\Phi = \frac{P^\varphi(i\sigma)}{Q^\varphi(i\sigma)}, \quad H = \frac{P^\eta(i\sigma)}{Q^\eta(i\sigma)}, \quad (48)$$

где

$$\left. \begin{aligned} P^\varphi(i\sigma) &= \left[\begin{aligned} &\left(m_{26}(i\sigma)^2 + \bar{m}_z^\beta(i\sigma) + \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta \gamma_\eta \right) \left(\frac{2\sqrt{\pi D \alpha} \sum_{l=0}^1 a_{fl}(i\sigma)^l}{\sum_{j=0}^4 b_{fj}(i\sigma)^j} + \frac{Q_1 a_u(i\sigma)}{\sum_{j=0}^2 b_{uj}(i\sigma)^j} \right) \\ &- \left(m_{22}(i\sigma)^2 + \bar{n}_y^\beta(i\sigma) + \bar{n}_y^\delta \gamma_\eta \right) \left(\frac{2\sqrt{\pi D \alpha} \sum_{l=0}^3 a_{ml}(i\sigma)^l}{\sum_{j=0}^6 b_{mj}(i\sigma)^j} + \frac{Q_2 a_u(i\sigma)}{\sum_{j=0}^2 b_{uj}(i\sigma)^j} \right) \end{aligned} \right] \quad (49) \\ Q^\varphi(i\sigma) &= - \left[\begin{aligned} &\left(m_{26}(i\sigma)^2 + \bar{m}_z^\beta(i\sigma) + \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta \gamma_\eta \right) \left(m_{26}(i\sigma)^2 - \left(m_{22} - \bar{n}_y^\omega + \bar{n}_y^\delta \gamma_\omega \right) (i\sigma) + \left(\bar{n}_y^\beta + \bar{n}_y^\delta \gamma_\varphi \right) \right) + \\ &\left(m_{22}(i\sigma)^2 + \bar{n}_y^\beta(i\sigma) + \bar{n}_y^\delta \gamma_\eta \right) \left(m_{26}(i\sigma)^2 - \left(m_{26} + \bar{m}_z^\omega - \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta \gamma_\omega \right) (i\sigma) - \left(\bar{m}_z^\beta - \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta \gamma_\varphi \right) \right) \end{aligned} \right] \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} P^\eta(i\sigma) &= \left[\begin{aligned} &\left(m_{26}(i\sigma)^2 - \left(m_{26} + \bar{m}_z^\omega - \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta \gamma_\omega \right) (i\sigma) - \left(\bar{m}_z^\beta - \bar{l}_p \bar{n}_y^\delta \gamma_\varphi \right) \right) \left(\frac{2\sqrt{\pi D \alpha} \sum_{l=0}^1 a_{fl}(i\sigma)^l}{\sum_{j=0}^4 b_{fj}(i\sigma)^j} + \frac{Q_1 a_u(i\sigma)}{\sum_{j=0}^2 b_{uj}(i\sigma)^j} \right) \\ &- \left(m_{26}(i\sigma)^2 - \left(m_{22} - \bar{n}_y^\omega + \bar{n}_y^\delta \gamma_\omega \right) (i\sigma) + \left(\bar{n}_y^\beta + \bar{n}_y^\delta \gamma_\varphi \right) \right) \left(\frac{2\sqrt{\pi D \alpha} \sum_{l=0}^3 a_{ml}(i\sigma)^l}{\sum_{j=0}^6 b_{mj}(i\sigma)^j} + \frac{Q_2 a_u(i\sigma)}{\sum_{j=0}^2 b_{uj}(i\sigma)^j} \right) \end{aligned} \right] \quad (50) \\ Q^\eta(i\sigma) &= -Q^\varphi(i\sigma) \end{aligned}$$

Так как дробно-рациональные функции (49) и (50) являются передаточными функциями преобразования белого шума ν в процессы η и φ , соответственно, то

$$\left| \frac{P^\varphi(i\sigma)}{Q^\varphi(i\sigma)} \right|^2 \quad \text{и} \quad \left| \frac{P^\eta(i\sigma)}{Q^\eta(i\sigma)} \right|^2$$

являются, соответственно, спектральными плотностями S_φ и S_η этих процессов. Согласно спектральной теории случайных процессов

$$D_\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{P^\varphi(i\sigma)}{Q^\varphi(i\sigma)} \right|^2 d\sigma, \quad D_\eta = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{P^\eta(i\sigma)}{Q^\eta(i\sigma)} \right|^2 d\sigma. \quad (51)$$

Непосредственной проверкой можно убедиться что, квадраты $\left(\frac{P^\varphi(i\sigma)}{Q^\varphi(i\sigma)} \right)^2$ и $\left(\frac{P^\eta(i\sigma)}{Q^\eta(i\sigma)} \right)^2$ являются функциями действительного параметра σ . Поэтому можно записать

$$D_\varphi = 2 \int_0^{\infty} \left(\frac{P^\varphi(i\sigma)}{Q^\varphi(i\sigma)} \right)^2 d\sigma, \quad D_\eta = 2 \int_0^{\infty} \left(\frac{P^\eta(i\sigma)}{Q^\eta(i\sigma)} \right)^2 d\sigma. \quad (52)$$

Таким образом, мы можем провести оценку ширины $2B_n$ ПДС, задав в (46) значения обеспеченности события

$$\left| \left(\frac{1}{2} - \bar{x}_f \right) \varphi + \eta + \frac{B}{2L} \right| \geq B_n$$

и среднеквадратических отклонений σ_φ и σ_η , либо оценить вероятность этого события при заданной ширине $2B_n$ ПДС и известных σ_φ и σ_η . Следовательно, при фиксированном значении обеспеченности ширина $2B_n$ полосы безопасного движения судна является минимальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Соболев Г. В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения.* – Л.: Судостроение, 1976. – 480 с.
2. *Воробьев Ю. Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере.* – СПб.: Судостроение, 1992. 224 с.
3. *Пугачев В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем.* – М.: Логос, 2000. – 1000 с.
4. *Некрасов В. А. Вероятностные задачи мореходности судов.* – Л.: Судостроение, 1978. – 304 с.
5. *Воробьев Ю. Л., Косой М. Б., Романадзе Д. Д. Спектральные характеристики морского волнения в районе одесского залива // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. Одесса: ОНМУ, 2002. – Вип 8. – С. 24-38.*
6. *Воробьев Ю. Л., Косой М. Б. Спектральные характеристики ветра в е одесском заливе // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. Одесса: ОНМУ, 2002. – Вип 9. – С. 3-18*
7. *Косой М. Б. Методика расчёта аэродинамических характеристик надводной части корпуса транспортных судов // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. Одесса: ОНМУ, 2003. – Вип. 11. – С. 90-106.*

УДК 629.12.539.4

О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ ОБОСНОВАНИИ ЗАПАСОВ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КРЕПЛЕНИЙ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ГРУЗОВ

В.В. Козляков, И.Ф. Давыдов, А.В. Ставицкий

1. Проблема обеспечения надежности судов при размещении и креплении тяжеловесных грузов включает три основных задачи:

- обеспечение общей и местной прочности корпуса и остойчивости при размещении и креплении грузов;
- обеспечение прочности и надежности самих грузов (контейнеры, лихтеры, плавучие сооружения и т.п.);
- обеспечение прочности и надежности элементов крепления грузов.

В статье рассмотрена, в основном, 3-я задача, включающая: оценку внешних сил и воздействий на грузы; оценку напряженности элементов креплений; обоснование запасов прочности и надежности.

Из-за относительной кратковременности рейсов судов с тяжеловесными грузами надежность креплений определяется, в основном, на базе критерия предельной пластической прочности.

В настоящее время прочность крепления грузов регламентируется всеми классификационными обществами и транспортными ведомствами морских стран, но нормативные требования существенно различаются и до настоящего времени не унифицированы.

При сравнительно малой стоимости креплений грузов последствия от их ненадежности могут достигать уровня катастроф, включая потери грузов и судна, экологический ущерб, и даже гибель экипажа.

Поэтому в статье выполнено сопоставление существующих нормативов и возможный вариант их обоснования с учетом технико-экономического подхода. Выполнен также анализ причин почти катастрофического разрушения креплений при перевозке уникального груза с массой 1870 т.

2. Гравитационные и инерционные нагрузки, действующие на грузы при качке, до недавнего времени определялись по приближенным формулам Ю.А. Шиманского [1], основанным на раздельном определении параметров бортовой, килевой и вертикальной качки в условиях резонанса при регулярном волнении. Предполагалось, что вертикальная качка совпадает с орбитальным движением частиц воды. Максимальные амплитуды бортовой и килевой качки рекомендовалось определять по углам входа в воду палубы и бака соответственно.

В несколько преобразованной форме [2] формулы для гравитационно-инерционных ускорений в долях $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ имеют вид:

При бортовой качке:

При килевой качке:

$$\bar{a}_y^B \cong 1,16 \sin \Theta_{max} + \left(\frac{2\pi}{\tau_6} \right)^2 \frac{\Theta_{max}}{g} z; \quad \bar{a}_x^K \cong 1,16 \sin \psi_{max} + \left(\frac{2\pi}{\tau_K} \right)^2 \frac{\psi_{max}}{g} y; \quad (1)$$

$$\bar{a}_z^B \cong 1,16 \cos \Theta_{max} + \left(\frac{2\pi}{\tau_6} \right)^2 \frac{\Theta_{max}}{g} y; \quad \bar{a}_z^K \cong 1,16 \cos \psi_{max} + \left(\frac{2\pi}{\tau_K} \right)^2 \frac{\psi_{max}}{g} z.$$

где Θ_{max} , τ_6 , ψ_{max} , τ_K - максимальные значения углов и периоды собственных колебаний соответственно при бортовой и килевой качке;

x , y , z - отстояние центра тяжести груза от миделя, диаметральной плоскости и центра тяжести судна соответственно.

Основным недостатком этих формул является произвольность величин и комбинаций Θ_{max} , ψ_{max} и невозможность установления корреляционной связи между ними и ускорениями при вертикальной качке \bar{a}_z .

Интенсивное развитие гидродинамической качки судов на регулярном волнении с 6-ю степенями свободы в 40-х - 60-х годах XX века, а также теории качки на стационарном нерегулярном волнении [3, 4] позволило значительно уточнить величины гравитационно-инерционных нагрузок на 2-х и 3-х мерном волнении, построить для них кратковременные и долговременные распределения и обосновать приближенные формулы для их определения.

Начиная с 1972 г. в Правилах DNV и других классификационных обществ, в частности, Германского Ллойда [5] в качестве расчетных используются величины с обеспеченностью 10^{-8} для судов неограниченного района плавания на основе долговременных распределений для Северной Атлантики:

$$\bar{a}_x = \frac{a_x}{g} = a_0 \sqrt{0,06 + A^2 - 0,25A};$$

$$\bar{a}_y = \frac{a_y}{g} = a_0 \sqrt{0,6 + 2,5 \left(\frac{x}{L} + 0,05 \right)^2 + K \left(1 + \frac{0,6KZ}{B} \right)^2}; \quad (2)$$

$$\bar{a}_z = \frac{a_z}{g} = a_0 \sqrt{1 + \left(5,3 - \frac{45}{L} \right)^2 \cdot \left(\frac{x}{L} + 0,05 \right)^2 \left(\frac{0,6}{C_b} \right)^{1,5}};$$

$$a_0 = \frac{0,2V}{\sqrt{L}} + \frac{34 - 600/L}{L}; K = \frac{13h}{B} \geq 1; A = \left(0,7 - \frac{L}{1200} + \frac{5Z}{L} \right) \frac{0,6}{C_b}$$

Проектирование и мореходные качества судов

где L, B, h – длина, ширина судна и метацентрическая высота, м;
 X, Z – отстояние центра тяжести груза от миделя и от ватерлинии.

Для судов ограниченного района плавания эти величины \bar{a}_i умножаются на редуциционный коэффициент $\varphi < 1$, неодинаковый в различных правилах (табл. 1).

Таблица 1. Редуциционные коэффициенты φ

Правила		Район плавания					
		Неорг.	Юорг	Поорг	Псп	Шсп	Ш
PMPC	1995	1	0,8	0,72	0,66	0,36	0,32
	1998	1	0,84	0,71	0,64	0,46	0,37
GL 2002	Неорг.	M			K50	K20	W
	1	0,9			0,75	0,66	0,6
RINA – 94	Неорг.	Mediterr.	National	Coastal	Coastal R	Sheltered	
	1	0,91	0,87	0,73	0,4	0,3	
BV – 2002	Неорг.	Summer	Tropic	Coastal		Sheltered	
	1	0,9	0,8	0,8		0,65	
DNV – 98	Неорг.	R1	R2	R3	R4	R5	
	1	0,9		0,75		0,5	

В действующих нормативных документах России (РД 31.11.21.24-96) и Украины (КНД 31.1.006-96) [6, 7] приведены упрощенные формулы для гравитационно-инерционных ускорений на волнении с $h_{3\%}^{\max} = 3 \div 11$ м:

$$\begin{aligned} \bar{a}_x &= \frac{a_x}{g} = A \left(0,18 + \frac{12}{L} \right); \\ \bar{a}_y &= \frac{a_y}{g} = A \left(0,3 + \frac{20}{L} \right) S; \\ \bar{a}_z &= \frac{a_z}{g} = A \left(0,36 + \frac{25}{L} \right), \end{aligned} \tag{3}$$

где $A = f(h_{3\%})$, см. табл. 2.

Таблица 2

$h_{3\%}^{\max}$, м	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	0,222	0,328	0,441	0,558	0,672	0,777	0,869	0,994	1,0

$h_{3\%} = 11$ м – для судов неограниченного района плавания;

$S = 1-1,4$ в зависимости от площади скуловых килей.

Формулы (3) применимы при:

$$L \geq 80 \text{ м}; B \geq 12 \text{ м}; d \geq 3 \text{ м};$$

$L/B = 5 \div 10$; $B/d = 2 \div 6$; $h/B = 0,02 \div 0,15$; $z_i \leq 6 \text{ м}$ (z_i – отстояние Ц.Т. груза от палубы).

При невыполнении этих условий рекомендуется определять \bar{a}_x , \bar{a}_y , \bar{a}_z путем прямого расчета качки на стационарном волнении с $h_{3\%} \leq 11 \text{ м}$ и принимать в качестве расчетных величины с обеспеченностью 3%, т.е. равные $a_i^P = 2,64 \sigma_i$, где σ_i – стандарт соответствующей величины.

Поскольку в формулы (3) не входят координаты X и Z центра тяжести груза, то можно предположить, что рекомендуемые величины a_x , a_y , и a_z близки к максимальным для судна в целом.

Принятие $h_{3\%}^{\max} = 11 \text{ м}$ для неограниченного района плавания не является бесспорным, т.к. при построении долговременных распределений обычно учитываются волны с $h_{3\%} \leq 25 \text{ м}$ которые, несмотря на малую вероятность встречи с ними, вносят большой вклад в величину расчетных нагрузок.

На основе долговременных распределений получены расчетные величины для \bar{a}_x , \bar{a}_y , и \bar{a}_z в «Нормах прочности» РМРС 1992 г. и 2002 г. издания [8, 9] и в Методике Гипроморнефтегаза, разработанной в ОИИМФ и изданной в 1988 г. [10], дополнительно учитывающей продолжительность рейса.

В Циркуляре ИМО №664 [11], а также в Руководстве [12] приводится оригинальная методика определения a_x , a_y , a_z с явным учетом L , V , h , x . Координата « z » учитывается приближенно, а величина B/h заключена в пределах $7 < B/h \leq 13$. Длительность рейса принята равной 25 суток.

В Методике РМРС – 97 [13] даны рекомендации для определения величин \bar{a}_x , \bar{a}_y , и \bar{a}_z для судов, перевозящих контейнеры с включением координат « x » и « z », но без учета « h » и скорости хода « V ».

В табл. 3 приведены результаты сопоставления величин \bar{a}_x , \bar{a}_y , и \bar{a}_z по всем перечисленным методикам для судна неограниченного района плавания типа «Варнемюнде» с характеристиками: $L_{\text{пл}} = 140,1 \text{ м}$, $B = 21,8 \text{ м}$, $d_{\text{ср}} = 7,46 \text{ м}$, $V = 15 \text{ уз.}$, $D = 15281 \text{ т}$, $z_g = 8,48 \text{ м}$, $h = 1,68 \text{ м}$, $z_{\text{гр}} \approx 9,14 \text{ м}$, $x_{\text{гр}} = 0,25L$.

В этой же таблице приведены и результаты расчетов гравитационно-инерционных нагрузок по программе [14], имеющей допуск Регистра, при $h_{3\%} = 11 \text{ м}$, $a_i^P = 2,64 \sigma_i$ и $a_i^P = 4,5 \sigma_i$ а также коэффициенты корреляции

$\Gamma_{a_y a_z}$ и $\Gamma_{a_x a_z}$ при наиболее опасных средних периодах волнения, только для двумерного волнения.

$a_i^{\max} = 4,5\sigma_{a_i}$ - максимальная величина при времени пребывания на расчетном волнении около 2-х суток.

Таблица 3. Сводная таблица относительных ускорений, регламентированных различными нормативами для т/х типа «Варнемюнде»

Наименование норматива		a_x	a_y	a_z	$\Gamma_{a_y a_z}$	$\Gamma_{a_x a_z}$	
Гипроморнефтегаз, [10]		0,33	0,82	0,57	0,5	0,75	
Германский ЛЛОЙД, [5]		0,33	0,68	0,76	1	1	
Нормы прочности РС-92, [8]		0,34	0,64	0,40	1	1	
НМУ РС-2002, [9]		0,23	0,60	0,38	1	1	
РД 31.11.21.24-96, [6]		0,27	0,62	0,54	1	1	
КБМ №664, [11]		0,24	0,52	0,56	1	1	
КНД 31.1.006-96, [7]		0,27	0,62	0,54	1	1	
РС-97, [12]		0,42	0,70	0,43	1	1	
Расчет при $h_{3\%} = 11$ м	$\varphi = 90^\circ$	$\bar{a}_i^I = 2,64\sigma_i$	0,22	0,58	0,55	0,02	0,90
	$\tau_{cp} = 12$ с	$\bar{a}_i^{II} = 4,5\sigma_i$	0,38	0,98	0,94	0,02	0,90
	$\varphi = 45^\circ$	$\bar{a}_i^I = 2,64\sigma_i$	0,08	1,22	0,03	~ 0	0,83
	$\tau_{cp} = 6$ с	$\bar{a}_i^{II} = 4,5\sigma_i$	0,14	2,07	0,05	~ 0	0,83
	$\varphi = 180^\circ$	$\bar{a}_i^I = 2,64\sigma_i$	0,30	—	0,27	—	0,88
	$\tau_{cp} = 10$ с	$\bar{a}_i^{II} = 4,5\sigma_i$	0,51	—	0,47	—	0,88

Табл. 3 свидетельствует о большом различии расчетных величин которое, по видимому, в какой-то мере смягчается различием в коэффициентах запаса и расчетных коэффициентах трения.

3. Для оценки особенностей качки нестандартных судов, не удовлетворяющих ограничениям [6, 7] приведем результаты расчета качки фидерного лихтеровоза «П. Антокольский» при перевозке уникального груза – плавучего пневмозерноперегрузателя с массой 1870 т в августе 1990 г. из Ленинграда в Новороссийск, анализ аварийного повреждения которого произведен в разделе 6 настоящей статьи.

Характеристики судна:

$L_{\text{мт}} = 141,2$ м; $B = 31,0$ м; $D = 15,45$ м; $D^* = 5,3$ м (высота грузовой палубы); $d = 4,3$ м; $C_b = 0,782$; $h = 8,3$ м.

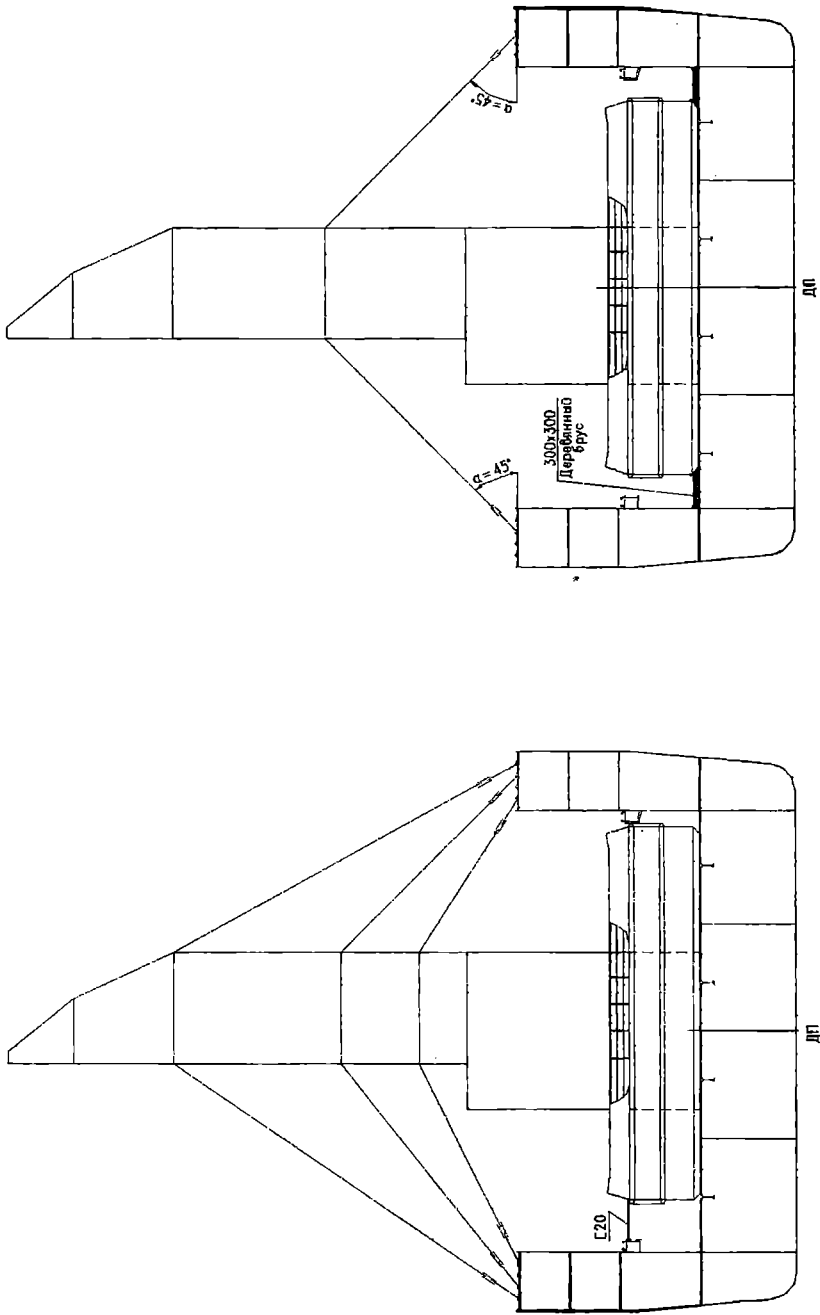


Рис. 1. Варианты размещения и крепления плавучего зернового пневмоперезружателя на грузовой палубе т/х "ПАВЕЛ АНТОКОЛЬСКИЙ"

Характеристики груза, расположенного на грузовой палубе (рис. 1)

$P_{гр} = 1870$ т; $l \times b = 40 \times 20$ м (длина и ширина груза); $X_{гр} = -40$ м; $Z_{гр} = 12,7$ м (высота ЦТ груза над ватерлинией).

Расчет гравитационно-инерционных ускорений \bar{a}_x , \bar{a}_y , и \bar{a}_z выполнен по программе [14] при высоте волны $h_{3\%} = 11$ м и наиболее опасных средних периодах на 2-х мерном стационарном волнении при курсовых углах $\varphi = 45^\circ, 90^\circ$ и 180° .

Кроме стандартов \bar{a}_x , \bar{a}_y , и \bar{a}_z определены коэффициенты корреляции $\Gamma_{a_y a_z}$ и $\Gamma_{a_x a_z}$, необходимые для суммирования соответствующих усилий.

Величины \bar{a}_i^p в долях от $g = 9,81$ м/с² приведены в табл. 4 и сопоставлены с результатами расчетов по всем приведенным ранее методикам.

Из табл. 4 следует еще большее различие расчетных величин, особенно с рекомендациями для стандартных судов, удовлетворяющим ограничениям [6, 7, 11].

Таблица 4. Сводная таблица относительных ускорений, регламентированных различными нормативами для т/х «Павел Антокольский»

Наименование норматива		a_x	a_y	a_z	$\Gamma_{a_y a_z}$	$\Gamma_{a_x a_z}$	
Гипроморнефтегаз, [10]		0,34	1,04	0,60	0,5	0,75	
Германский ЛЛЮЙД, [5]		0,27	1,48	0,55	1	1	
Нормы прочности РС-92, [8]		0,34	0,67	0,42	1	1	
НМУ РС-2002, [9]		0,2	0,39	0,25	1	1	
РД 31.11.21.24-96, [6]		0,26	0,62	0,54	1	1	
КБМ №664, [11]		0,25	0,49	0,45	1	1	
КНД 31.1.006-96, [7]		0,26	0,62	0,54	1	1	
РС-97, [12]		0,36	0,68	0,64	1	1	
Расчет при $h_{3\%} = 11$ м	$\varphi = 90^\circ$ $\tau_{ср} = 12$ с	$\bar{a}_i^I = 2,64\sigma_i$	0,37	0,61	0,30	0,62	1
		$\bar{a}_i^{II} = 4,5\sigma_i$	0,63	1,04	0,50	0,62	1
	$\varphi = 45^\circ$ $\tau_{ср} = 6$ с	$\bar{a}_i^I = 2,64\sigma_i$	0,05	0,16	0,06	0,21	0,69
		$\bar{a}_i^{II} = 4,5\sigma_i$	0,09	0,25	0,11	0,21	0,69
	$\varphi = 180^\circ$ $\tau_{ср} = 10$ с	$\bar{a}_i^I = 2,64\sigma_i$	0,18	—	0,18	—	0,92
		$\bar{a}_i^{II} = 4,5\sigma_i$	0,31	—	0,31	—	0,92

Характерно, что величины \bar{a}_z для $\varphi=90^\circ$ и 180° существенно различаются, а коэффициенты корреляции Γ_{a_y, a_z} и Γ_{a_x, a_z} не равны единице, как принято во всех нормативных документах, кроме [10].

4. Для оценки и обеспечения надежности опорных устройств в соответствии с критерием предельной пластической прочности необходимо составить условие предельного равновесия при сдвиге и опрокидывании системы груз-кильблок в поперечном и продольном направлении (плоскости OYZ и OXZ). В общем случае целесообразно принять, что расчетные ускорения a_i распределены по закону Вейбулла с параметрами масштаба и формы соответственно ζ_i и K_i , а базовыми являются величины с обеспеченностью 10^{-8} \bar{a}_{-8}^y , \bar{a}_{-8}^x , \bar{a}_{-8}^z при $a_{-8i} = \zeta_i (18,42)^{1/K_i}$.

Расчетные величины с вероятностью превышения 10^{-n} могут быть выражены через базовые следующим образом:

$$\bar{a}_{-n}^y = \bar{a}_{-8}^y \left(\frac{n_y}{8} \right)^{1/K_y}; \quad \bar{a}_{-n}^x = \bar{a}_{-8}^x \left(\frac{n_x}{8} \right)^{1/K_x}; \quad \bar{a}_{-n}^z = \bar{a}_{-8}^z \left(\frac{n_z}{8} \right)^{1/K_z}.$$

С учетом обозначений рис. 2, пренебрегая начальным натяжением найтовок, условия предельного равновесия при сдвиге и опрокидывании в плоскости OYZ примут вид:

$$\begin{aligned} & \left[\bar{a}_{-8}^y + \Gamma_{a, a_z} \cdot f \cdot \bar{a}_{-8}^z + \frac{F_y \cdot P_{-8}}{P_{np}} \right] P_{np} \cdot \left(\frac{n_{y1}}{8} \right)^{1/K_y} = \\ & = P_{np} \cdot f + \sum_i T_{np_i} \cos \alpha_i + \sum_i R_{yn_i}^y; \quad (4) \\ & \left[\bar{a}_{-8}^y + \Gamma_{a, a_z} + \frac{F_y \cdot P_{-8}}{P_{np}} \frac{l_{2B}}{l_{1B}} \right] P_{np} \cdot \left(\frac{n_{y2}}{8} \right)^{1/K_y} = \\ & = P_{np} \frac{l_{2B}}{l_{1B}} + \sum_i T_{np_i} \frac{l_{3Bi}}{l_{1B}} + \sum_i R_{yn_i}^y \frac{l_{Ri}}{l_{1B}} \end{aligned}$$

при сдвиге и опрокидывании в плоскости XOZ:

$$\begin{aligned} & \left[\bar{a}_{-8}^x + \gamma_{a_1 a_2} \cdot f \cdot \bar{a}_{-8}^z \right] P_{гр} \cdot \left(\frac{n_{x1}}{8} \right)^{1/2 K_x} = \\ & = P_{гр} \cdot f + \sum_j T_{пp_j} \cos \gamma_j + \sum_j R_{уп_j}^x; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \left[\bar{a}_{-8}^x + \gamma_{a_1 a_2} + \frac{l_{2c}}{l_{1c}} + \frac{F_x \cdot p_{-8}}{P_{гр}} \right] P_{гр} \cdot \left(\frac{n_{x2}}{8} \right)^{1/2 K_x} = \\ & = P_{гр} \cdot \frac{l_{2c}}{l_{1c}} + \sum_j T_{пp_j} \frac{l_{3вi}}{l_{1в}} + \sum_j R_{уп_j}^x \frac{l_{Rj}}{l_{1c}} \end{aligned}$$

где $f = 0 \div 0,7$ – коэффициент трения;

$\gamma_{a_1 a_2}$ и $\gamma_{a_x a_z}$ – коэффициенты корреляции;

F_y и F_x – площади парусности груза, m^2 ;

$p_{-8}^y \cong p_{-8}^x \cong 2$ кПа – давление ветра на поверхность груза с обеспеченностью 10^{-8} .

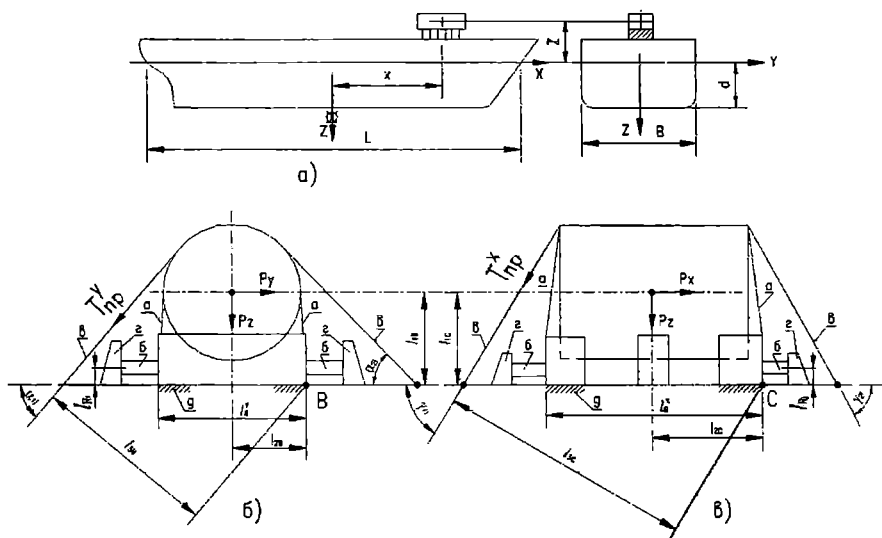


Рис. 2. Схема расположения и крепления груза:

а) – схема в подвижной системе координат; б), в) – детали крепления и силы в поперечном и продольном сечениях соответственно; а – хомуты; б – деревянные упоры; в – охватывающие найтовы и оттяжки; г – металлические упоры; д – приварка кильблока

При длительности рейса T_p , с числом встреч с волнами

$$N \cong \frac{T_p}{T_{cp}},$$

где $T_{cp} \cong 4 \lg L$, с – средний период встречи с волнами.

Вероятность разрушения креплений (перехода в предельное состояние) с учетом (3) составит при сдвиге и опрокидывании в плоскости OYZ:

$$Q'_y \cong N \cdot Q_{1y} \cong N \cdot \exp \left[-18,42 \left(\frac{R_{np}^y}{P_{гр} \cdot \bar{a}_1^y} \right)^{K_y} \right],$$

$$Q''_y \cong N \cdot Q_{2y} \cong N \cdot \exp \left[-18,42 \left(\frac{\bar{M}_{np}^y}{P_{гр} \cdot \bar{a}_2^y} \right)^{K_y} \right]$$
(6)

где $R_{np}^y = \sum R_{уп_i}^y + \sum T_{ш_i} \cos \alpha_i + P_{гр} \cdot f$;

$$\bar{a}_1^y = \bar{a}_{-8}^y + r_{a_y a_z} \cdot f \cdot \bar{a}_{-8}^z + \frac{F_y P_{-8}^y}{P_{гр}};$$

$$\bar{M}_{np}^y = \sum R_{уп_i} \frac{\ell R_i}{\ell_{1B}} + \sum T_{ш_i} \frac{\ell_{3B_i}}{\ell_{1B}} + P_{гр} \frac{\ell_{2B}}{\ell_{1B}};$$

$$\bar{a}_2^z = \bar{a}_{-8}^z + r_{a_y a_z} \frac{\ell_{2B}}{\ell_{1B}} \bar{a}_{-8}^z + \frac{F_y P_{-8}^y}{P_{гр}}.$$

При сдвиге и опрокидывании в плоскости XOZ

$$Q'_x = Q_{1x} \cong N \cdot \exp \left[-18,42 \left(\frac{R_{np}^x}{P_{гр} \cdot \bar{a}_1^x} \right)^{K_x} \right],$$

$$Q''_x = Q_{2y} \cong N \cdot \exp \left[-18,42 \left(\frac{\bar{M}_{np}^x}{P_{гр} \cdot \bar{a}_2^x} \right)^{K_x} \right]$$
(7)

где $R_{np}^x = \sum R_{уп_j}^y + \sum T_{ш_j} \cos \gamma_j + P_{гр} \cdot f$;

$$\bar{a}_1^x = \bar{a}_{-8}^x + \frac{F_x P_{-8}^x}{P_{гр}} + r_{axaz} \cdot f \cdot \bar{a}_{-8}^z;$$

$$\bar{M}_{пр}^x = \sum R_{упj} \frac{\ell_{Rj}}{\ell_{1C}} + \sum T_{прj}^x \frac{\ell_{3Ci}}{\ell_{1C}} + P_{гр} \frac{\ell_{2C}}{\ell_{1C}};$$

$$\bar{a}_2^x = \bar{a}_{-8}^x + \frac{F_x P_{-8}^x}{P_{гр}} + r_{axaz} \frac{\ell_{2B}}{\ell_{1B}} \bar{a}_{-8}^z.$$

Важно подчеркнуть, что при определении $R_{пр}$ и $\bar{M}_{пр}$ необходимо четко различать жесткие и гибкие элементы крепления. Если имеются и жесткие упоры и гибкие найтовы, то они работают не совместно, а последовательно. Сначала разрушаются упоры при очень малых перемещениях груза (мм), а гибкие разрушаются значительно позднее, когда перемещения груза достигают величин в десятки раз больших [15].

Поэтому, определяя $R_{пр}$ следует при наличии жестких упоров полагать

$$\sum T_{прi}^y = 0 \text{ и } \sum T_{прj}^x = 0, \text{ а найтовы учитывать только при отсутствии}$$

упоров. При определении $\bar{M}_{пр}^x$ и $\bar{M}_{пр}^y$ при $\ell_{Ri} = 0$ и $\ell_{Rj} = 0$ следует учитывать только найтовы, которые должны обеспечивать неопрокидываемость груза. Параметры формы закона Вейбулла K_x, K_y, K_z обычно принимают равными: $K_x = K_y = K_z = 1$.

5. Для определения нормативных значений вероятности разрушения можно использовать два пути: эмпирический и технико-экономический.

Первый путь состоит в анализе расчетных вероятностей разрушения Q_i^Φ по формулам (6), (7) для множества успешных и аварийных перевозок грузов и осреднения этих величин соответственно для успешных и аварийных рейсов.

$$Q_1^{усп} = \frac{\sum_{N_1} Q_{1i}^\Phi}{N_1}; \quad Q_1^{авар} = \frac{\sum_{N_2} Q_{1j}}{N_2}. \quad (8)$$

В качестве нормативного значения целесообразно принять

$$Q_{шт}^{норм} \leq Q_{шт}^{усп}.$$

Анализ величин Q_1 (при однократной встрече с волной) приводит к выводу, что успешные рейсы при $p_y = p_x = 1$ соответствуют $Q_{шт} = 10^{-12} - 10^{-16}$. Поэтому в качестве расчетных величин ускорений целесообразно принимать $p_n \geq 12$, а $Q_1 \leq 10^{-12}$.

Более объективным является второй путь обоснования $Q_{пл}$ и K^H на основе определения их из условия минимума суммарных затрат «З» на изготовление и установку средств крепления «Со · K^{Θ_1} », прямого « $C_1 \cdot K^{\Theta_1}$ » и косвенного ущерба «U» от ненадежности креплений (включая потерю груза, судна, экологический ущерб и даже гибель экипажа) [16].

$$Z = C_0 K^{\Theta_1} + (C_1 K^{\Theta_2} + U) \cdot N \cdot \exp[-18,42(K)^{K_i}],$$

где $K_i = \frac{R_{гр}^i}{P_{гр} \cdot \bar{a}_{-8}^0}$ - условное значение коэффициента запаса; (9)

$\bar{a}_{-8}^0 = \bar{a}_i^y$ или \bar{a}_i^x , $R_{гр}^y$, $R_{гр}^x$ - в соответствии с формулами (6) и (7);

C_0 , Θ_1 , C_1 , Θ_2 - эмпирические коэффициенты технологичности и ремонтпригодности креплений.

Вводя относительные величины $\bar{Z} = \frac{Z}{C_0}$; $\bar{C}_1 = \frac{C_1}{C_0}$; $\bar{U} = \frac{U}{C_0}$ и,

приравнявая производную $\frac{d\bar{Z}}{dK} = 0$, получим систему уравнений для

определения оптимальных величин $Q_{пл}^{опт}$ и $K_{опт}^i$:

$$Q_{пл}^{опт} = \frac{\Theta_1 \cdot K^{\Theta_1-1}}{(\bar{C}_1 \cdot K^{\Theta_2} + \bar{U}) K^{K_i-1} \cdot K_i - \Theta_2 K^{\Theta_2-1}}; \quad (10)$$

$$K^{опт} = \left[-\frac{1}{18,42} \ln \left(\frac{Q_{пл}^{опт}}{N} \right) \right]^{1/K_i}$$

Система (10) решается методом последовательных приближений, принимая в качестве первого приближения $Q_{пл}^1 = \frac{1}{U}$.

Для креплений грузов стоимость креплений C_0 при $K_i = 1$ на много порядков меньше величины косвенного ущерба: $\bar{U} = \frac{U}{C_0} \cong 10^4 \div 10^{12}$, а величины $C_0 \approx C_1$; $K_i \approx 1$; $\Theta_1 \approx \Theta_2$

$$\bar{Z} = K^{\Theta_1} + (K^{\Theta_1} + \bar{U}) \cdot N \cdot \exp[-18,42K];$$

$$Q_{\text{пл}}^{\text{опт}} \approx \frac{1}{\frac{(K^{\Theta_1 + \bar{U}}) K_{K_i - \Theta_1}}{\Theta_1} - 1}; \quad K_{\text{опт}}^i = -\frac{1}{8} \lg \left(\frac{Q_{\text{пл}}^{\text{опт}}}{N} \right).$$

Поэтому искомые величины определяются практически сразу

$$Q_{\text{пл}}^{\text{опт}} \approx \frac{1}{\bar{U}}; \quad K_{\text{опт}}^i = -\frac{1}{18,42} \ln \left(\frac{1}{\bar{U} \cdot N} \right) = \frac{\lg \bar{U} \cdot N}{8}.$$

При $N = 10^6$ (рейс 115 суток)

$$\bar{U} = 10^4 \div 10^{12};$$

$$K_{\text{опт}} = -\frac{1}{18,42} \ln \left(\frac{1}{10^6 \cdot (10^4 \div 10^{12})} \right) = \frac{\lg 10^{10} \div 10^{18}}{8} = \frac{10 \div 18}{8} = 1,25 \div 2,25$$

Графики относительных суммарных затрат (рис. 3) при $\Theta_1 = 0,8$ имеют характерный минимум ущельного типа с почти вертикальной левой ветвью. Поэтому важно обеспечить $K_{\text{норм}} > K_{\text{опт}}$, а $Q_{\text{пл}}^{\text{норм}} < Q_{\text{пл}}^{\text{опт}}$ т.к. стоимость креплений с ростом коэффициента K растет незначительно, а вероятность разрушения резко уменьшается.

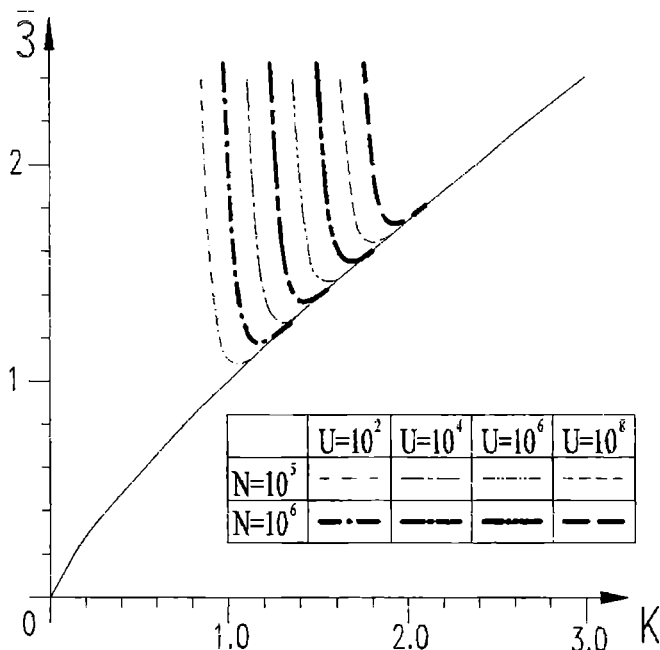


Рис. 3. График относительных суммарных затрат

Проектирование и мореходные качества судов

В нормативных документах [6, 7] величина $K^{\text{норм}} \approx 1,3$, причем при нагрузках значительно меньших соответствующих обеспеченности 10^{-8} . При этом величина $\bar{U} \approx 10^4$ явно не соответствует возможному косвенному ущербу.

6. Зная $Q_{\text{пл}}^{\text{норм}}$ и $K_{\text{пл}}^{\text{норм}}$ и полагая их одинаковыми для всех вариантов сдвига и опрокидывания в плоскостях XOZ и YOZ, можно сформулировать условие предельной прочности креплений.

В плоскости OYZ

$$R_{\text{пр}}^y = \sum R_{\text{уп}_i}^y + \sum T_{\text{пр}} \cos \alpha_i + P_{\text{гр}} \cdot f \geq \bar{a}_1^y P_{\text{гр}} \left[-\ln \left(\frac{Q_{\text{пл}}^{\text{норм}}}{N} \right) / 18,42 \right]^{1/K_y};$$

$$\bar{M}_{\text{пр}}^y = \sum R_{y_i}^y \frac{l_{R_i}^y}{l_{1B}} + \sum T_{\text{пр}}^y \frac{l_{3B_i}}{l_{1B}} + P_{\text{гр}} \cdot \frac{l_{2B_i}}{l_{1B}} \geq \bar{a}_2^y P_{\text{гр}} \left[-\ln \left(\frac{Q_{\text{пл}}^{\text{норм}}}{N} \right) / 18,42 \right]^{1/K_y}, \quad (11)$$

где $\bar{a}_1^y = \bar{a}_{-8}^y + r_{a_y a_z} \cdot f \cdot \bar{a}_{-8}^z + \frac{F_y \cdot P_{-8}^y}{P_{\text{гр}}};$

$$\bar{a}_2^y = \bar{a}_{-8}^y + r_{a_y a_z} \cdot \frac{l_{2B}}{l_{1B}} + \frac{F_y \cdot P_{-8}^y}{P_{\text{гр}}}.$$

В плоскости XOZ

$$R_{\text{пр}}^x = \sum R_{\text{уп}_j}^x + \sum T_{\text{пр}_j} \cos \alpha_j + P_{\text{гр}} \cdot f \geq \bar{a}_1^x P_{\text{гр}} \left[-\ln \left(\frac{Q_{\text{пл}}^{\text{норм}}}{N} \right) / 18,42 \right]^{1/K_x};$$

$$\bar{M}_{\text{пр}}^x = \sum R_{y_j}^x \frac{l_{R_j}^x}{l_{1C}} + \sum T_{\text{пр}_j}^x \frac{l_{3C_j}}{l_{1C}} + P_{\text{гр}} \cdot \frac{l_{2C}}{l_{1C}} \geq \bar{a}_2^x P_{\text{гр}} \left[-\ln \left(\frac{Q_{\text{пл}}^{\text{норм}}}{N} \right) / 18,42 \right]^{1/K_x}, \quad (12)$$

где $\bar{a}_1^x = \bar{a}_{-8}^x + r_{a_x a_z} \cdot f \cdot \bar{a}_{-8}^z + \frac{F_x \cdot P_{-8}^x}{P_{\text{гр}}};$

$$\bar{a}_2^x = \bar{a}_{-8}^x + r_{a_x a_z} \cdot \bar{a}_{-8}^z \cdot \frac{l_{2C}}{l_{1C}} + \frac{F_x \cdot P_{-8}^x}{P_{\text{гр}}}.$$

Из-за различной жесткости упоров и найтовов при одновременном их использовании в формулах (11), (12) следует положить $T_{при} = 0$ и $T_{прj} = 0$. В случаях, когда установлены только найтовы или при $\ell_{Ri} = \ell_{Rj} = 0$ в формулах (10), (11) следует положить $R_{уп_i} = R_{уп_j} = 0$.

В практических расчетах креплений обычно распределение волновых нагрузок принимается экспоненциальным, т.е. $K_y = K_x = K_z = 1$ и расчетные формулы упрощаются.

7. Пример анализа причин разрушения креплений плавучего зернового пневмоперегрузителя с массой 1870 т на фидерном лихтеровозе «П. Антокольский» в 1990 г.

Схема крепления и мидель-шпангоут лихтеровоза показаны на рисунке 1. Груз был закреплен 15-ю стальными упорами (швеллер N20) длиной 2,1 м и 120-ю найтовыми с разрывной нагрузкой 216 кН каждый. В Северном море при $h_{3\%} \approx 4,5$ м при бортовой качке с амплитудой $\Theta_{max} \approx 25^\circ$ и периоде 6,5 с сначала были разрушены все 15 упоров в результате потери устойчивости, затем 60 найтовов одного борта. После этого груз развил достаточно большую скорость и смял внутренний привальный брус, деформировал бортовые конструкции и повредил крепления кормовых ворот к бортовым башням. При последующем смещении к противоположному борту груз смял внутренний привальный брус этого борта и разрушил часть оставшихся найтовов. Дальнейшее движение груза было остановлено героическими усилиями экипажа, установившего деревянные клинья и упоры.

Основной причиной разрушения креплений, по-видимому, явилось неудачное проектное обоснование и совместный учет креплений, состоящих из гибких и жестких связей, а также ограничение волнения $h_{3\%} \leq 4,5$ м, которое трудно реализовать при длительном океанском переходе на судне, имеющем практически неограниченный район плавания. В табл. 4 были определены расчетные величины гравитационно-инерционных нагрузок по различным методикам и прямым расчетом при различных $h_{3\%}$, которые, в ряде случаев, превышают принятое в проекте значение $\bar{a}_y^p = 0,62$ из-за нестандартных исходных данных:

$$B/d_{ср} = 31/4,3 = 7,2; h/B = 8,3/31 = 0,27.$$

С учетом проектных ограничений при сдвигающей нагрузке равной

$$Y_y^p = \bar{a}_y^p \cdot P_{гр} = 0,62 \cdot 1870 = 1154 \text{ тс} = 11321 \text{ кН},$$

условие несдвигаемости выполняется только при одновременном учете 15 жестких упоров и 60 гибких найтовов с одного борта. Действительно, упор из швеллера N20 с площадью $F = 23,4 \text{ см}^2$ и минимальном моменте

инерции $\bar{J}_{\min} = 113 \text{ см}^4$ и длине 213 см имеет Эйлера напряжения $\sigma_s = 216 \text{ МПа}$, а критические напряжения $\sigma_{кр} = 171 \text{ МПа}$. Предельная нагрузка для 15 упоров

$$\sum R_{уп_i} = 171 \cdot 23,4 \cdot 10^{-4} \cdot 15 = 0,40 \cdot 15 = 6 \text{ МН} = 6000 \text{ кН.}$$

Сила трения при коэффициенте трения сталь-сталь при $f = 0,15$;
 $\bar{a}_z = 0,4$

$$R_{тр} = P_{тр} \cdot f(1 - \bar{a}_z) = 11321 \cdot 0,15 \cdot 0,6 = 1019 \text{ кН.}$$

Предельная нагрузка 60 найтовов при $\alpha_{ср} = 45^\circ$

$$\sum T_{н_j} \cdot \cos \alpha_j = 60 \cdot 216 \cdot 0,707 = 4581 \text{ кН.}$$

Предельная величина сил, препятствующих сдвигу

$$\sum R_{уп_i} + \sum T_{тр_j} + R_{тр} = 6000 + 4581 + 1019 = 11600 \text{ кН} > R_p = 11321 \text{ кН.}$$

при расчетном сдвигающем усилии 11321 кН.

В действительности, из-за большой разницы жесткостей упоров и найтовов сначала практически всю нагрузку берут на себя упоры - швеллеры, коэффициент жесткости которых

$$C_{уп} = 15 \frac{F_{уп}^0}{\ell_{уп}} = 15 \frac{2,06 \cdot 10^5 \cdot 23,4 \cdot 10^{-4}}{2,13} = 3395 \text{ МН/м.}$$

Коэффициент жесткости найтовов при $\ell_n = 17,42 \text{ м}$, $d = 0,02 \text{ м}$. $E \approx 10^5 \text{ МПа}$;

$$f_n^0 = \pi^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$K_n = 60 \frac{E_1 \cdot f_n \cdot \cos^2 \alpha}{\ell_n} = 60 \frac{10^5 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,707^2}{17,42} = 54 \text{ МН/м,}$$

т.е. в 63 раза меньше. Поэтому при $\sigma_{уп}^{\max} = \sigma_{кр} = 171 \text{ МПа}$, укорочение упора

$$\Delta \ell_{уп} = \frac{\sigma_{кр}}{E} \ell_{уп} = \frac{171}{2,06 \cdot 10^5} \cdot 2,13 = 0,0017 \text{ м} = 1,7 \text{ мм.}$$

Дополнительное усилие в найтовах при $\Delta \ell_{уп} = 1,7 \text{ мм}$ составит

$$\Delta T_n = \frac{E_1 F_n \cdot \cos \alpha \cdot \ell_{уп}^{\max}}{\ell_n} = \frac{10^5 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,707 \cdot 0,0017}{17,42} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ МН} = 2,4 \text{ кН,}$$

что в 45 раз меньше предельного (108 кН) и в 90 раз меньше разрушающего усилия в найтове.

Таким образом, сначала разрушаются упоры, после чего груз начинает передвигаться. С увеличением усилий в найтовах до $T_{кр} = 108$ (216) кН при перемещении

$$\Delta \ell_{пр}^{max} = \frac{T_H^{пр} \cdot \ell}{E_1 f_H \cdot \cos \alpha} = \frac{(108 \div 216) \cdot 10^3 \cdot 17,42}{10^5 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,707} = (0,085 \div 0,17) \text{ м}$$

найтовы разрушаются, после чего груз начинает свободное движение в сторону борта под действием силы

$$P_y \cong P_{пр} \cdot \cos \alpha - P_{тр} = 11320 \cdot 0,707 - 1019 = 6984 \text{ кН} = 6,98 \text{ МН}$$

$$y = \frac{1}{2M} t^2 \cdot P_y$$

Время касания борта при $y = \Delta L = 1,96 \text{ м}$.

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta \ell \cdot M}{P_y}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,96 \cdot 1870}{6984}} = 1,024 \text{ с.}$$

Скорость груза в момент контакта

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = t \cdot \frac{P_y}{M} = \frac{6984 \cdot 1,024}{1870} = 3,82 \text{ м/с.}$$

После контакта начинается второй период движения груза вместе с упругой связью – бортом, жесткость которого

$$C = \frac{1}{A} = \frac{G \sum \omega}{\ell_B} = \frac{79231 \cdot 0,26}{4,5} = 4200 \text{ МН/м;}$$

$\sum \omega = 17 \cdot 312 \cdot 10^{-4} = 0,26 \text{ м}^2$ - площадь стенки рамных шпангоутов в зоне контакта.

Частота собственных колебаний груза с бортом

$$\lambda = \sqrt{\frac{C}{M_{гр}}} = \sqrt{\frac{4202}{1870 \cdot 10^{-3}}} = 47,4 \text{ 1/с.}$$

Максимальное перемещение груза в контакте с бортом

$$y_{max} = \frac{\dot{y}_0(t_1)}{\lambda} = \frac{3,82}{47,4} = 0,081 \text{ м.}$$

Максимальное давление на борт

$$R_{\max} = C \cdot y_{\max} = 4200 \cdot 0,081 = 340,2 \text{ МН} \approx 340200 \text{ кН.}$$

Коэффициент динамичности

$$K_d = \frac{R_{\max}}{P_y} = \frac{340,2}{6,98} = 48,74.$$

Предельная нагрузка на борт при схеме перехода в предельное состояние (рис.4)

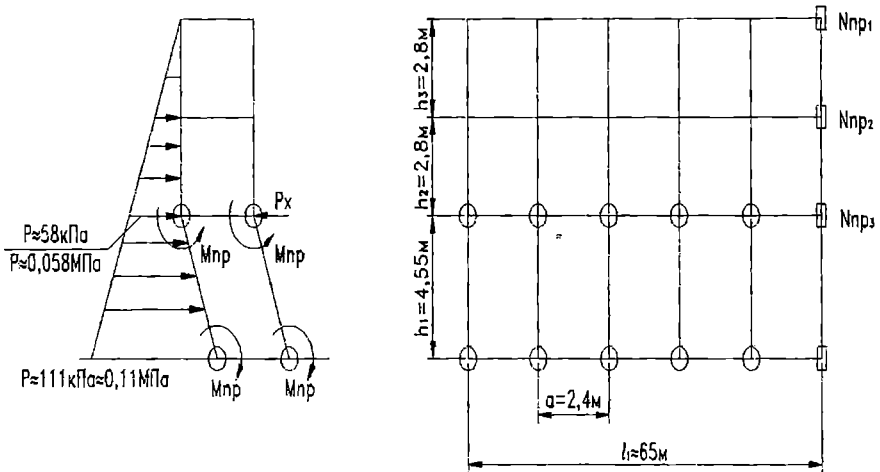


Рис. 4. Схема разрушения борта

$$P_y^{\text{пр}} = N_{\text{пр}1} + N_{\text{пр}2} + N_{\text{пр}3} + \frac{4 \cdot M_{\text{пр}} \ell_1}{h_1 a} + \frac{0,168 \cdot h_1 \cdot \ell_1}{4} + \frac{0,058 \cdot (h_2 + h_3) \ell_1}{2} =$$

$$= 8,81 + 8,81 + 3,74 + \frac{4 \cdot 0,65}{4,55} \cdot 2,4 + \frac{0,168 \cdot 4,55 \cdot 65}{4} + \frac{0,058 \cdot 5,6 \cdot 65}{2} = 59,8 \text{ МН,}$$

где $N_{\text{пр}i}$ – предельные перерезывающие силы 3-х палуб одной башни;
 $M_{\text{пр}}$ – предельный изгибающий момент одного рамного шпангоута башни.

Таким образом, $R_{\max} = 340,2$ МН более, чем в 5 раз превосходит предельную нагрузку борта $P_y^{\text{пр}} = 59,4$ МН.

В действительности величина $R_{\max} < 340,2$ МН, т.к. в расчете не учтены пластические деформации привального бруса и борта судна, а также положительное влияние присоединенных масс воды. Тем не менее факт $R_{\max} \gg P_y^{\text{пр}}$ свидетельствует о возможности катастрофического развития событий после разрушения креплений груза, связанного с

разрушением бортов и кормовых ворот и последующим заливанием грузовой палубы.

8. В заключение следует отметить целесообразность унификации параметров расчетных нагрузок \bar{a}_{-8}^y , \bar{a}_{-8}^x , \bar{a}_{-8}^z , Γ_{ayaz} , Γ_{axaz} для судов с различными районами плавания и корректировки в сторону увеличения коэффициентов запаса в зависимости от возможного косвенного ущерба \bar{U} и продолжительности рейса

$$K^* = \frac{\lg(\bar{U} \cdot N)}{8} \geq 1,5.$$

Даже значительное увеличение K^* по сравнению с [6, 7] равного 1,3 экономически целесообразно, т.к. небольшое относительное увеличение стоимости креплений резко увеличивает безопасность перевозки уникальных грузов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиманский Ю.А. *Динамический расчет судовых конструкций*. – Л.: Судпромгиз, 1948.
2. Курдюмов А.А. *Прочность корабля*. – Л.: Судпромгиз, 1956.
3. St. Denis and Pierson. *On the Motion of Ships in Confused sea* // *TSNAME*, vol. 61, 1953.
4. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. *Качка судов на морском волнении*. – Л.: Судостроение, 1969.
5. *Germanischer Lloyd Rules for Classification and Construction of Seagoing Steel Ships* – Hamburg, 2002.
6. РД 31.11.21.24-96 *Правила безопасности морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов*. – СПб.: ЦНИИМФ, 1996.
7. КНД 31.1.006-96 *Правила морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов*. – Одесса, 1996.
8. *Российский Морской Регистр Судоходства. Нормы прочности морских судов*. – СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 1992.
9. *Российский Морской Регистр Судоходства. Нормативно-методические указания по расчетам прочности морских судов* // *Сборник нормативно-методических материалов. Книга одиннадцатая*. – СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2002.
10. *Правила перевозки супертяжеловесных и крупногабаритных грузов на транспортных и краномонтажных плавучих средствах*. – М.: Министерство нефтяной промышленности СССР, 1988.

11. Методы оценки эффективности устройств для крепления нестандартных грузов // Циркуляр ИМО КБМ №664.
12. Российский Морской Регистр Судоходства. Руководство по разработке наставлений по креплению грузов. – СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 1997.
13. Российский Морской Регистр Судоходства. Технические требования к размещению и креплению контейнеров на судах, приспособленных для их перевозки. – СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 1997.
14. Гулиев Ю.М., Давыдов И.Ф., Элис Я.М. Система программ для определения характеристик мореходности судов и плавучих сооружений // 13-й международный семинар по гидродинамике судна, Варна, Болгария. Т.1. 1984.
15. Козляков В.В. Прочностные проблемы модернизации и эксплуатации судов // Сборник научных трудов ОИИМФ «Теория и практика модернизации судов» – М.: ЦРИА Морфлот, 1981.
16. Козляков В.В. Об экономическом анализе запасов прочности конструкций морских транспортных судов. – Л.: Труды ЛКИ, 1969. - Вып. 66. Л.: Судостроение, 1979.- № 7.

УДК 656.61.052

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗГОНА И ПОДТОРМАЖИВАНИЯ СУДНА. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД

П.И. Яркин, А.С. Мальцев, Е.В. Калиниченко

Современные представления о маневренных свойствах судов показывают, что имеющиеся на судне данные о маневренных свойствах, которыми оно снабжено согласно требованиям Международной морской организации (ИМО) и нормативным документам Украины, составляют только 20% от общего количества параметров, которые характеризуют поведение судна при движении.

Среди данных о маневренных свойствах судов, которыми они обеспечены в настоящее время, режимы разгона и подтормаживания не представлены вообще. Кроме того, в существующей литературе по этому вопросу приведены зависимости, которые не позволяют получить значения времени и пути, проходимые судами при разгоне и подтормаживании с достаточной точностью.

Между тем указанные параметры необходимо знать при практическом маневрировании для обеспечения безопасного плавания. По этой причине вопросы поиска подходящих математических моделей движения судна при разгоне и подтормаживании являются весьма актуальными.

Полностью маневренные свойства судна характеризуют данные о его инерционных качествах и управляемости, которые приведены в работе [1]. Кроме того, крупнотоннажные суда обладают маневренными свойствами, которые существенно отличаются от характеристик среднетоннажных судов, из-за наличия больших инерционных сил [2].

Методики расчета характеристик разгона и подтормаживания приведены, главным образом, в учебной литературе [3, 4], а также в работе [2].

В работе [3] при решении дифференциального уравнения принято допущение, что упор винта при разгоне и подтормаживании остается постоянным, а назначенное число оборотов наступает мгновенно, в момент подачи команды. Последнее допущение можно принять, учитывая тот факт, что разгон двигателя происходит за время 3-5 секунд, а сам процесс изменения режима движения судна занимает значительное время.

В работе [2] и работе [4] дифференциальное уравнение движения судна при разгоне представлено в виде

$$m_x \frac{dV}{dt} = -\mu \cdot V^2 + P, \quad (1)$$

где m_x – масса судна с учетом присоединенной массы воды по оси x ;
 μ – коэффициент сопротивления воды;
 P – упор винта на передний ход.

В учебнике [4] сделано допущение о постоянстве силы упора винта P и равенстве ее силе сопротивления воды при установившемся режиме движения.

$$\mu V_{уст}^2 = P \quad (2)$$

С учетом принятых допущений дифференциальное уравнение (1) приведено к виду

$$m_x \frac{dV}{dt} = \mu (V_{уст}^2 - V^2), \quad (3)$$

где $V_{уст}$ – значение установившейся скорости;
 V – текущее значение скорости.

После интегрирования дифференциального уравнения (3) в пределах от V до $V_{уст}$ в работах [2, 4] получены расчетные формулы для определения пути и времени разгона при $V < V_{уст}$ и подтормаживания при $V_{уст} < V$.

По нашему мнению полученные зависимости не дают корректных результатов в связи с тем, что в уравнении разгона соединены два вида движения – установившееся и неустановившееся. Когда судно разгоняется от неподвижного состояния, т.е. $V^2 = 0$, то инерционной силой становится $\mu V_{уст}^2$, численно равная сопротивлению, но с положительным знаком. Поэтому вычисленные значения пути и времени разгона по формулам, приведенным в учебнике [4], для танкера «Василий Порик» оказались в два раза больше, чем полученные при натуральных испытаниях.

Целью настоящей статьи является теоретическое обоснование методики расчета длины пути и времени разгона и подтормаживания для формализации процесса маневрирования.

При разгоне судна от заданной скорости (или нулевой скорости) до установившейся скорости величина силы инерции равняется разности между силой упора гребного винта P и сопротивлением корпуса R , соответствующего установившейся скорости, т.е.

$$(1 + k)m \frac{dV}{dt} = (1 - \tau)P - R, \quad (4)$$

где k – коэффициент присоединенной массы судна;
 $\frac{dV}{dt}$ – ускорение при разгоне судна;

τ - коэффициент засасывания, учитывающий влияние корпуса на работу винта.

Для вывода расчетных формул пути и времени разгона и подгормаживания выразим силу упора с помощью формулы

$$P = K_1 \rho n^2 D_e^4, \quad (5)$$

где K_1 - коэффициент упора винта;

ρ - массовая плотность воды, кг/м³;

n - частота вращения гребного винта, об/с;

D_e - диаметр гребного винта, м.

Коэффициент упора, K_1 является функцией относительной поступи λ гребного винта и обычно определяется по кривым действия винта. Зависимость $K_1 = f(\lambda)$ близка к линейной и может быть аппроксимирована линейным уравнением (см. рис. 1), для чего необходимо составить отношение

$$\frac{K_{1_{шт}} - K_{1_o}}{\lambda_o} = \frac{K_{1_{шт}} - K_1}{\lambda}, \quad (6)$$

из которого получим

$$K_1 = K_{1_{шт}} - \left(K_{1_{шт}} - K_{1_o} \right) \frac{\lambda}{\lambda_o},$$

где $K_{1_{шт}}$ - коэффициент упора при швартовном режиме;

K_{1_o} - коэффициент упора при установившемся режиме движения;

K_1 - текущее значение коэффициента упора;

λ_o, λ - относительная поступь в установившемся режиме движения

и текущее значение относительной поступи.

Поскольку

$$\frac{\lambda}{\lambda_o} = \frac{V(1-\varphi)}{nD_e} \cdot \frac{nD_e}{V_o(1-\varphi)} = \frac{V}{V_o} \cdot \frac{nD_e}{1-\varphi} = const,$$

где φ - коэффициент попутного потока, то

$$K_1 = K_{1_{шт}} - \left(\frac{K_{1_{шт}} - K_{1_o}}{V_o} \right) V. \quad (7)$$

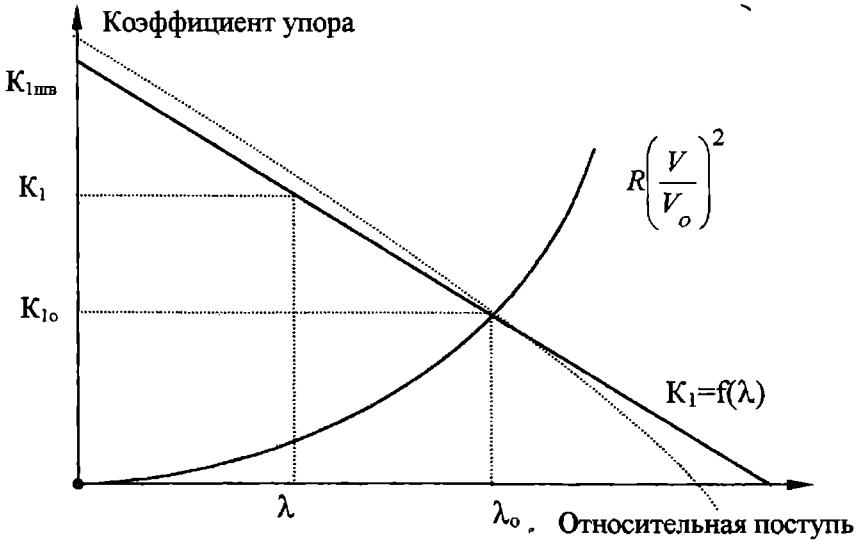


Рис. 1. Коэффициент упора в функции относительной поступи винта, аппроксимированный линейной зависимостью

Подставив в правую часть дифференциального уравнения (4) выражения (5) и (6), получим

$$(1 - \tau)P - R = \left[K_{1шв} - \left(\frac{K_{1шв} - K_{1о}}{V_o} \right) V \right] * \rho n^2 D_g^4 (1 - \tau) - \mu V^a \quad (8)$$

где $R = \mu V^a$;

μ - коэффициент пропорциональности;

a - показатель степени;

$V_o = V_{уст}$ - скорость установившегося движения.

Обозначим

$$P_{шв} = K_{1шв} \rho n^2 D_g^4; \quad R_o = (1 - \tau)P_o = K_{1о} \rho n^2 D_g^4, \quad (9)$$

где R_o - сопротивление корпуса судна при установившемся движении;
 P_o - упор винта при установившемся движении;

K_{10} – коэффициент упора винта при установившемся движении.
После подстановки (9) в (8) и раскрытия скобок получим

$$(1 - \tau)P_0 - R_0 = P_{шв} - \left(\frac{P_{шв} - R_0}{V_0} \right) V - \mu V^a. \quad (10)$$

Определим величину среднего упора гребного винта в заданном интервале скорости

$$P_{cp} = P_{шв} - \left(\frac{P_{шв} - R_0}{V_0} \right) \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right). \quad (11)$$

Для определения силы среднего сопротивления движению судна в том же интервале скорости применим теорему о среднем интегрального исчисления, согласно которой

$$R_{cp} = \frac{\mu(V_2^{a+1} - V_1^{a+1})}{(a+1)(V_2 - V_1)}. \quad (12)$$

При наиболее часто используемом показателе степени $a = 2$ формула (12) принимает вид

$$R_{cp} = \frac{\mu}{3}(V_2^2 + V_2V_1 + V_1^2).$$

Весь процесс разгона разделим по скорости на несколько интервалов (V_1, V_2, \dots, V_n – границы интервалов) и предположим, что в каждом интервале работа сил сопротивления и упора гребного винта равна работе их средних величин. Тогда правую часть уравнения (4) перепишем так:

$$(1 + \kappa) \frac{dV}{dt} = P_{cp} - R_{cp}, \quad (13)$$

из которого на основании теорем об изменении количества движения и кинетической энергии [5] получим формулы для определения времени и длины пути разгона и подтормаживания:

$$t = \frac{(1 + \kappa)m}{P_{cp} - R_{cp}} [V_2 - V_1]; \quad (14)$$

$$S = \frac{(1 + \kappa)m}{2(P_{cp} - R_{cp})} [V_2^2 - V_1^2] \quad (15)$$

Коэффициент пропорциональности μ можно определить из общей формулы сопротивления. В соответствии с теорией подобия сопротивление воды движению судна вычисляется по формуле

$$R = \xi \frac{\rho \Omega}{2} V^2, \text{ откуда } \mu = \xi \frac{\rho}{2} \Omega, \quad (16)$$

где $\xi = 0,0085 - 0,051Fr + 0,1246Fr^2$ - коэффициент полного сопротивления судов, полученный авторами путем аппроксимации кривой полного сопротивления;

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} - \text{число Фруда; } g=9,81 \text{ м/с}^2;$$

L - длина судна между перпендикулярами, м;

$$\Omega = D^{2/3} \left(4,854 + 0,492 \frac{B}{T} \right) - \text{площадь смоченной поверхности, м}^2;$$

D - водоизмещение судна, т;

B/T - отношение ширины судна к средней осадке.

Коэффициент упора гребного винта на передний ход в швартовном режиме можно определить по формуле

$$K_{1шв} = 0,4 \frac{H}{D_e} + 0,018. \quad (17)$$

Эффект присоединенной массы возникает при движении твердого тела в жидкости. При разгоне и торможении судна величину присоединенной массы можно подсчитать по формуле из работы [6]

$$\Delta m = \frac{1,5\pi\rho}{4} T^2 B, \quad (18)$$

где T - осадка судна, м;

B - ширина судна, м;

$$\pi = 3,14...$$

Тогда масса судна с учетом коэффициента присоединенной массы, будет

$$m + \Delta m = (1 + k)m. \quad (19)$$

В отечественной литературе принято считать коэффициент «к» постоянной величиной [3, 4], равной 0,1, т.е. 10% от массового водоизмещения судна, что может быть допустимо для среднетоннажных судов. На практике у крупнотоннажных танкеров и балкеров

коэффициент присоединенной массы может быть равен $\kappa = 0,05$ и менее, а у среднетоннажных судов – $\kappa = 0,12$ и более. Такие погрешности могут существенно исказить расчетные характеристики разгона и торможения судов.

Пример. Определить длину пути и время разгона и подгормаживания для т/х «Василий Порик».

Водоизмещение судна – $D_c = 29100$ т.;

длина между перпендикулярами – $L = 174$ м;

ширина – $B = 23,0$ м;

средняя осадка – $T = 9,5$ м;

диаметр винта – $D_a = 5,9$ м;

шаг винта – $H = 5,04$ м;

частота вращения винта на передний ход, – $n_0 = 1,415$ об/с;

скорость судна при n_0 – $V_0 = 6,69$ м/с;

скорость полного переднего хода – $V_{\text{м}} = 8,75$ м/с.

Результаты вычислений представим в табл. 1.

Порядок расчета

$$1. \Delta m = \frac{1,5 \cdot 3,14 \cdot 1020}{4} 9,5^2 23,0 = 2493079 \text{ кг}; \quad \kappa = \frac{2493079}{29100000} = 0,08.$$

$$2. (1 + \kappa)m = 31593080 \text{ кг}.$$

$$3. \mu = 0,0035 \frac{1020}{2} 5719 = 10234; \quad R_0 = 10234 \cdot 6,69^2 = 458053 \text{ Н}.$$

$$4. R_{cp} = \frac{10234}{3} (V_2^2 + V_2 V_1 + V_1^2).$$

$$5. K_{1_{\text{шв}}} = 0,4 \frac{5,04}{5,9} + 0,018 = 0,359.$$

$$6. P_{\text{шв}} = 0,359 \cdot 1020 \cdot 1,415^2 \cdot 5,9^4 = 890134 \text{ Н}.$$

$$7. P_{cp} = 890134 - \left(\frac{890134 - 458053}{6,69} \right) V_{cp}.$$

$$8. t = \frac{31593080}{P_{cp} - R_{cp}} \left[V_2 - V_1 \right]; \quad S = \frac{(31593080)}{2(P_{cp} - R_{cp})} \left[V_2^2 - V_1^2 \right].$$

Проектирование и мореходные качества судов

Таблица 1. Характеристики разгона и подтормаживания т/х «Василий Порик»

v_1 м/с	v_2 м/с	v_{cp} м/с	S_m	t_c	ΣS_m	Σt_c	$\Sigma t_{мин}$
Разгон							
0	1	0,5	18,5	37,0	18,5	37,0	0,62
1	2	1,5	61,6	41,0	80,1	78,0	1,30
2	3	2,5	119,0	47,6	199,0	126,0	2,10
3	4	3,5	205,6	59,0	405,0	184,0	3,00
4	5	4,5	363,0	80,7	768,0	265,0	4,40
5	6	5,5	774,0	141,0	1542,0	406,0	6,70
Подтормаживание							
8,7	8	8,35	508,5	61,0	508,5	61,0	1,00
8	7,5	7,75	543,0	70,0	1051,0	131,0	2,20
7,5	7	7,25	985,0	136,0	2036,0	267,0	4,40

В табл. 2 представлены результаты натуральных замеров пути и времени разгона т/х «Василий Порик» из неподвижного состояния до скорости 12 узлов (6,2 м/с).

Таблица 2. Разгон из неподвижного состояния т/х «Василий Порик»

Время разгона, мин. - с	Путь разгона, м	Время разгона, мин. - с	Путь разгона, м
0	0	05-20	930
02-21	186	05-55	1116
03-18	372	06-26	1302
04-05	558	06-58	1488
04-45	744		

По данным табл.1 и 2 наибольшие расхождения между натурной и вычисленной кривыми составили по времени 5%, а по длине пути 10%. Это свидетельствует о приемлемой для практики точности предлагаемого метода.

Выводы. В статье разработана методика аналитического расчета характеристик разгона и подтормаживания судна. Благодаря линейной аппроксимации зависимости коэффициента упора гребного винта от его относительной поступи на элементарном участке скорости разгона и

подтормаживания появилась возможность получить простые расчетные формулы. Сравнение результатов натурального испытания т/х «Василий Порик» и результатов расчета по предлагаемой методике показало, что относительная погрешность в длине выбега не превышает 10%, а относительная погрешность во времени – 5%. Полученные результаты могут быть использованы в автоматизированных системах ходового мостика, для информационного обеспечения процесса маневрирования и при расчетах данных об инерционно-тормозных свойствах судна в конструкторских бюро и морских учебных заведениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев А.С. *Маневрирование судов при расхождении*. - Одесса: ОМГЦ, 2002. - 208 с.
2. Павленко Л.В. *Маневренные характеристики крупнотоннажных судов // Судовождение: Сб. научн. трудов ОГМА*, - Одесса: Латстар, 2002. - Вып.5. - С.74 - 88.
3. *Управление судном и его техническая эксплуатация / Под ред. А.И. Щетиной*. - М.: Транспорт, 1983. – 655 с.
4. *Управление судном / Под ред. В.И. Снопкова*. - М.: Транспорт, 1991. – 359 с.
5. Яркин П.И., Калиниченко Е.В. *Определение характеристик активного торможения судна. Альтернативный подход // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. - Одесса: Латстар, 2003. – Вып. 6. - С. 164-171.
6. Hewins E.F. et al. *The backing power of geared – turbine driven vessels. Trans. SNAME. Vol. 58. 1950. – 261-301 pp.*

УДК 656.61:002.6:338.26

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕШЕНИЙ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СУДОХОДНЫХ КОМПАНИЙ

А.Г. Шибает

Сложность системы перевозки грузов морским флотом, многообразие форм и показателей, описывающих элементы транспортного процесса, затрудняют анализ и синтез структуры системы управления, то есть обнаружение ее несоответствия современным требованиям и устранение имеющих место недостатков.

Как известно, управление осуществляется на всех уровнях организационной структуры и реализуется через соответствующие функции, состав и содержание которых до настоящего времени не являются устоявшимися категориями в науке управления [1, 2, 3]. Нет однозначного решения вопросов по методам, моделям и технологии принятия решений. Хотя вопросы реализации – создание информационно-технологических положений – являются ключевыми в любой системе управления.

Анализ существующих автоматизированных систем управления морским транспортом показал, что им присущи значительные недостатки. В структуре АСУ «Морфлот» они вызвали параллелизм в разработках, увеличение стоимости, сроков проектных работ и значительные трудности в их проведении, а в отдельных случаях – невозможность синтеза конкретных задач в подсистемах. Дальнейшим развитием АСУ «Морфлот» явилось создание в рамках центрального комплекса задач «Оперативное планирование и регулирование работы флота и портов» отдельной автоматизированной системы ведения непрерывного графика работы флота (АСВ НГРФ). Большое количество существующих проектов автоматизированного ведения непрерывного графика работы флота и опыт эксплуатации этих проектов свидетельствуют о значительных недостатках этой системы. К основным недостаткам следует отнести:

- ориентацию на конкретные условия деятельности флота судовой компании, устаревшую схему централизованной обработки информации;
- отсутствие автоматизации самих процессов принятия решений;
- большой объем входной информации, требующей ручного ввода, снижающий оперативность формирования соответствующих массивов и управленческих решений, принимаемых на их основе;
- отсутствие постоянного (оперативного) доступа к информации у работников эксплуатационных подразделений пароходств;

• замкнутость, невозможность эффективного взаимодействия с другими подсистемами и комплексами задач АСУ основной (эксплуатационной) деятельности судоходной компании.

Попытка преодолеть имеющиеся место недостатки на базе локальных вычислительных сетей была предпринята в рамках «Многоуровневой системы оперативного управления перевозками грузов во взаимодействии с другими видами транспорта и клиентурой с использованием вычислительной техники» (АСУ «Оперплан»). Начатые в 1988 г. разработки не получили своего завершения как это предусматривалось техническим заданием на систему. Основными причинами этого послужили:

- структурные изменения в стране и, как следствие этого, в отрасли;

- ошибки в организации и проектировании, аналогичные тем, которые были допущены при создании АСУ «Морфлот», АСВ НГРФ и, прежде всего, нарушение целостности системы.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей статьи является разработка основных положений информационно-технологического обеспечения решений в деятельности судоходных компаний.

Содержанием состава операций, направленных на реализацию любого проекта [4], предусматривается формирование структурно определенной последовательности этапов работ, ведущих к достижению установленного ранее комплекса целей и работ. В связи с этим методическое обеспечение системы управления перевозками грузов и работой флота включает основы организации и функционирования целевых подсистем «ГРУЗ» и «СУДА».

Целью создания подсистемы «ГРУЗ» является обеспечение эффективного управления перевозкой экспортно-импортных и каботажных грузов флотом судоходного предприятия и зафрахтованным тоннажем. Ее функционирование основывается на грузовой базе, для формирования и ведения которой служат следующие основные сведения и документы:

- прогнозные значения объемов перевозок (на 5 лет и более) по традиционной для судоходной компании номенклатуре грузов с учетом развития торговых отношений между клиентурой, а также конъюнктуры фрахтового рынка;

- прямые долгосрочные договоры (5 лет, год) на перевозку экспортных, импортных и каботажных грузов;

- квартальные, с распределением по месяцам, заявки на перевозку в соответствии с прямыми договорами;

- месячные сведения на перевозку экспортных, импортных и каботажных грузов;

- оперативные данные о грузах, полученных от отечественных и зарубежных агентств, а также экспедиторских компаний;

- диспетчерская информация, поступающая с судов по формам ДИСП и РОК.

В грузовой базе содержится информация по каждой партии груза со всеми признаками декомпозиции объекта управления и временного горизонта. Дополнительно указывается соответствующий признак для грузов, перевозка которых оформлена прямыми договорами. Формирование и ведение базы производится, распределено по отдельным отделам (подразделениям) предприятия, за которыми закреплён флот, а внутри отдела - по группам судов, в соответствии с их специализацией (лесовозы, контейнеровозы и т.д.).

Характер поступления сведений о структуре грузопотоков определяет степень агрегирования и уровень достоверности информации о грузах, о чем делается соответствующая отметка в грузовой базе (информация «пятилетняя», «годовая», «квартальная» и т.д.). Реализация общих функций управления (табл. 1) и соответствующих методов характеризуется следующими положениями.

Учет при ведении грузовой базы предполагает фиксацию, группировку и последовательное замещение информации по мере ее получения с менее высоким уровнем достоверности и более значительной степенью агрегирования на данные, характеризующиеся большей точностью, информационной емкостью и меньшей степенью агрегирования (прогнозная - «пятилетняя» на «годовую», «годовая» на «квартальную» и т.д.). По результатам расстановки флота, формирования календарного плана (графика) и рейсового задания (подсистема «СУДА») в грузовой базе ведется учет грузов, покрытых тоннажем, либо о месте нахождения отдельных партий груза (в порту, на судне). Таким образом, информационная база за счет выполнения задач учета обеспечивает пользователям получение сведений (отчетности) о плане и ходе выполнения перевозок грузов на любой интервал времени с учетом даты запроса по отдельным судам, группам судов, отделам, пароходству в целом, в том числе по отправлению, законченным рейсам, видам перевозок, направлениям перевозок и отправителям.

Контроль предполагает при получении информации более высокого уровня достоверности сопоставление ее по отдельным грузам с ранее полученными данными и выдачу отклонений («годовая» по отношению к «пятилетней», «квартальная» по отношению к «годовой» и т.д.). Сопоставление информации о грузах представляет собой процесс сравнения их объемов в текущем периоде с тем, что было предусмотрено ранее с указанием возникающих при этом отклонений («+» либо «-»). Также предусматривается сопоставление сведений о грузах, обеспеченных тоннажем с общим объемом перевозок, по результатам которого вырабатываются новые плановые и регулировочные решения.

Контроль в подсистеме по перечисленным выше задачам производится разностным или индексным способом.

Таблица 1. Состав комплекса задач подсистемы «СУДА»

Временной горизонт	Функции управления				
	Планирование	Регулирование	Учёт	Контроль	Анализ
Пять лет	<p>Определение провозной способности флота. Формирование плана пополнения и списания судов. Прогнозирование затрат и результатов работы флота</p>	<p>Согласование производственного и маркетингового планов. Перераспределение флота по региональным рынкам</p>	<p>Регистрация судов по типам и сериям дифференцированно по годам постройки</p>	<p>Определение провозной способности флота и объёмов перевозок</p>	<p>Установление степени ответственности специализации флота структуре грузопотоков</p>
Год	<p>Расстановка флота по направлениям работы. Составление расписаний работы судов. Расчёт валовно-финансовых показателей</p>	<p>Перераспределение флота по регионам и направлениям работы. Решение вопросов о фрахтовании (отфрахтовании) судов</p>	<p>Регистрация судов обеспеченных и необеспеченных работой</p>	<p>Выявление отклонений планируемой работы от фактической</p>	<p>Выявление факторов определяющих транспортную деятельность флота и доли каждого из них в результатах. Изучение конъюнктуры фрахтового рынка</p>

Продолжение таблицы 1

Временной горизонт	Функции управления				Анализ
	Планирование	Регулирование	Учёт	Контроль	
Квартал	То же	То же; определение субститута судов	Регистрация плановой и фактической работы судов	То же	То же
Месяц	Формирование схем (маршрутов) движения судна и графиков работы флота	Переадресация судов для обеспечения выполнения графиков и расписаний	То же	То же	То же
Декада	Составление рейсовых заданий (графиков)	Пересоставление рейсового задания в случае переадресации судна	То же	То же	То же

Анализ следует непосредственно за контролем и использует его результаты. В процессе его реализации решаются две основные задачи [5].

Первая состоит в определении причин (факторов), обусловивших установленное контролем отклонение.

Вторая сводится к количественной оценке доли каждого фактора в общем значении отклонения.

В процессе анализа применяются численные методы: теории индексов, статистическое исследование взаимосвязей, ряды динамики, выявления изолированного влияния факторов и другие.

Реализация функции планирования предполагает на основе информации различного уровня достоверности решение задач и отдельных вопросов, связанных с проектированием хода перевозочного процесса. При пятилетнем горизонте в случае отсутствия долгосрочных контрактов и договоров устанавливаются прогнозные значения объемов перевозок по традиционной для судоходной компании номенклатуре грузов, направлениям и отправителям.

По результатам расстановки флота (подсистема «СУДА») на основе информации грузовой базы осуществляется формирование:

- планов перевозок внешнеторговых и каботажных грузов в разрезе года и квартала;
- календарного плана (графика) вывоза экспортных, импортных и каботажных грузов в месячном и декадном разрезах времени.

Наряду с вышеуказанными задачами осуществляется распределение грузов между:

а) отделами (подразделениями) судоходной компании; внутри отделов между группами судов с учетом их специализации; между судами группы с учетом партионности грузов и схем движения;

б) грузовыми помещениями судна (формирование загрузки) с учетом партионности грузов, корреспонденции портов захода в схеме движения и особых условий в погрузке и перевозке грузов.

Реализация функции регулирования предполагает:

а) перераспределение грузов с целью обеспечения наиболее полного их покрытия тоннажем и выполнения ранее принятых судовладельцем обязательств по доставке грузов;

б) решение вопросов о поиске и привлечении дополнительных грузов либо об отказе в перевозке по отдельным отправителям (при наличии такой возможности) в зависимости от соотношения объема перевозок и провозной способности флота.

В свою очередь, целью создания подсистемы «СУДА» является обеспечение эффективного управления работой транспортного флота морской судоходной компании, а также зафрахтованным тоннажем. Ее функционирование предполагает информационное отображение деятельности судов и имеет в своей основе:

Организация перевозок и управление работой флота

- данные о грузопотоках - по всем временным горизонтам, структуре и объемах из целевой подсистемы «ГРУЗ»;
- сведения о техническом состоянии флота - сроки ремонта, освидетельствование Регистром, списание и т.д.;
- план пополнения состава флота;
- технико-эксплуатационные характеристики судов;
- диспетчерскую информацию, поступающую с судов по формам КОНТР, ДИСП и РОК;
- сведения, поступающие от отечественных и зарубежных агентств, а также экспедиторских компаний;
- данные о нормативах выполнения технологических операций из целевой подсистемы «НОРМА».

Совокупность действий судна, наилучшим образом обеспечивающих в конкретных условиях выполнение определенных производственных функций, представляет собой технологический процесс (рейс) как центральный элемент при информационном описании в базе данных подсистемы управления деятельностью транспортного флота судоходной компании. Определение рейса и его границ имеет принципиальное значение для правильной его организации и выполнения. Границы (начало и окончание) рейса регламентируются соответствующими нормативными документами.

В зависимости от временного горизонта и организационного уровня управление транспортным процессом судов осуществляется с различной степенью детализации рейса (количество рейсов типа судна, одного судна; стояночные и ходовые процессы рейса судна и т.д.).

Все технологические операции реализуются посредством выполнения отдельных групп операций, включающих в себя элементарные, то есть такие, воздействия которых оказывает влияние на технологический процесс в целом при управлении последним.

Описание состояния объекта управления осуществляется в натуральном и стоимостном выражении с учетом результатов и затрат, связанных с транспортной деятельностью судов. Размеры результатов и затраты оцениваются с помощью соответствующих эксплуатационных и финансово-валютных показателей.

Ведение базы данных, так же, как и для подсистемы «ГРУЗ», основано на замещении плановых данных на оперативные, затем документальные учетные по мере их поступления.

Управление транспортным процессом при горизонте времени:

- пятилетнем, годовом и в отдельных случаях квартальном основано на совокупности рейсов типов судов, либо отдельного судна;
- квартальном - на рабочих процессах;
- месячном - на производственных и непроизводственных стояночных и ходовых операциях;

• декадном - на основных, вспомогательных, вынужденных и организационно обусловленных стояночных и ходовых операциях.

Управление судном в рейсе осуществляется с выделением групп и отдельных элементарных операций.

В базе данных содержатся сведения по каждому судну со всеми признаками декомпозиции объекта управления и временного горизонта. Группировка этих сведений осуществляется по отделам предприятия, за которыми закреплен флот, по группам судов в соответствии со специализацией дифференцировано по курирующим их групповым диспетчерам. Состояние объекта управления за какой-либо отрезок времени определяется данными различной степени агрегирования и уровня достоверности, о чем делается соответствующая отметка при выдаче сведений. Например, по состоянию на текущий момент показатели работы флота составляют X. Из них:

а - по законченным рейсам;

б - по отправлению;

в - на основе месячной информации.

Функции управления и методы их реализации в подсистеме характеризуются положениями (табл. 2), изложенными ниже.

Учет предполагает фиксирование, группировку (в случае необходимости - агрегирование) и последовательное замещение информации по мере ее формирования либо поступления с менее высоким уровнем достоверности и более значительной степенью агрегирования на данные, характеризующиеся большей точностью и детализацией («пяtilетняя» на «годовую», «годовая» на «квартальную» и т.д.).

При пяtilетнем временном горизонте производится учет: провозной способности флота на основе прогноза грузопотоков и состояния грузового фрахтового рынка, технического состояния флота, сроков вывода из эксплуатации в ремонт, переоборудования и освидетельствования Регистром, списания и пополнения судов.

При годовом и квартальном временном горизонте учет реализуется теми же задачами, что и в пяtilетнем разрезе времени. Наряду с этим учитывается число рейсов и соответствующих им показателей (по возможности с указанием позиций судов), дифференцированно по отделам и направлениям (линиям) их работы. При месячном и декадном временном горизонте дополнительно учитываются:

а) сроки подачи в порты отечественных и иностранных судов под обработку и последующую перевозку грузов. В случае субститута из состава флота пароходства либо при замене отечественного судна иностранным соответствующие сведения также вносятся в базу данных для последующего контроля и анализа принятых решений;

б) обязательства перед торговыми объединениями и предприятиями по перевозке (отправлению) экспортных и импортных грузов отечественными и фрахтованными иностранными судами.

Таблица 2. Состав комплекса задач подсистемы «ГРУЗ»

Функции управления					
Временной горизонт	Планирование	Регулирование	Учёт	Контроль	Анализ
Пять лет	Прогнозирование структуры грузопотоков	Поиск грузов в случае превышения провозной способности флота над объёмом перевозок	Регистрация и систематизация информации о долгосрочных контрактах	Сопоставление вновь появившихся грузопотоков с данными их прогноза и выявление отклонений	Установление тенденций развития структуры грузопотоков и факторов их определяющих; степени покрытия грузопотоков тоннажом других судоводных предприятий
	Формирование плана перевозок	То же	Регистрация и систематизация ранее поступивших сведений о структуре грузопотоков и новых контрактов на перевозку	Выявление отклонений в договорных сроках и объёмах поступления грузов от фактических, а также сроков и объёмов вывоза грузов	Определение интенсивности, сезонности грузопотоков; причин отклонения от договорных объёмов и сроков поступления и отправки грузов
Год					

Продолжение таблицы 2

Временной горизонт	Функции управления				Анализ
	Планирование	Регулирование	Учёт	Контроль	
Квартал	Распределение грузов по группам флота в соответствии с их специализацией	То же	То же по квартальным сведениям о грузопотоках	То же	Определение факторов вызывавших отклонения в поступлении и отправке грузов
Месяц	Закрепление грузов за судами (судном) в соответствии со схемой движения; распределение грузов между судами	Перераспределение грузов между отделами (группами) и судами	Регистрация грузов, покрытых тоннажем и закреплённых за конкретным судном	То же	То же
Декада	Разработка плана размещения грузов на судне	Перераспределение грузов по грузовым помещениям судна в случае необходимости; предьявления к отправке отдельных партий; решение вопросов о попутной перевозке грузов	Регистрация грузов, отправленных (доставленных) на конкретном судне	То же	То же

При всех временных горизонтах производится учет необеспеченного грузом тоннажа по типам, отдельным судам и рейсам. В случае отфрахтования судов под перевозку ГИФ и фрахтования тоннажа для доставки экспортных и импортных грузов соответствующая учетная информация вносится в базу данных подсистемы. Аналогично выполняется учет сроков передачи судов в аренду, отправления в экспедицию, возвращения из аренды и экспедиций.

Учет фактического хода выполнения технологического процесса работы судна включает:

- регистрацию элементов рейса и значений показателей, характеризующих эти элементы;
- первичную обработку зарегистрированных данных и фиксацию полученной таким образом первичной информации в документах. При этом учету подлежат лишь элементарные операции.

Выходная информация, получаемая в процессе обработки хранимых в базе данных, представляет собой совокупность (обычно укрупненных) элементов рейса и показателей, характеризующих эти элементы. Процесс обработки заключается в выборе необходимых исходных данных, укрупнении операций в соответствии со структурой множества элементов рейса и расчете показателей этих операций. Выбор исходных данных производится по признакам, заданным выходной информацией. Эти признаки могут быть общими для всех показателей выходной информации и частными, то есть характеризующими только отдельные показатели. Укрупнение операций выполняется в соответствии со структурой множества элементов рейса и условий работы судов. При этом каждый элемент вышестоящего уровня формируется как совокупность элементов нижестоящего уровня иерархии, связанных с этим укрупненным элементом. Расчет производится в соответствии с общеизвестными аналитическими зависимостями. Выходная информация представляется пользователям по соответствующим формам, которые в зависимости от содержащегося в них набора показателей подразделяются на стандартные и произвольные.

Реализация функции контроль в подсистеме «СУДА» так же, как и в подсистеме «ГРУЗ», предполагает на основе результатов учета сопоставление данных текущего состояния объекта с ранее установленными на базе информации более низкого уровня достоверности. Сопоставление информации о работе флота представляет собой процесс сравнения показателей, описывающих в натуральном и денежном выражении состояние объекта управления, текущего периода с тем, что было предусмотрено ранее, с указанием возникающих при этом отклонений. Во всех временных горизонтах контроль осуществляется по каждой из задач и соответствующих ей показателям, то есть за:

- провозной способностью флота (с использованием бюджета эксплуатационного времени судов) и необеспеченным грузом тоннажем с

последующим решением вопросов отфрахтования судов предприятия под перевозку грузов иностранных фрахтователей либо фрахтования иностранного тоннажа для доставки экспортных и импортных грузов;

- своевременной подачей судов в соответствии с обязательствами пароходства;

- ходом выполнения плана перевозок флотом на дату запроса в натуральном и денежном выражении нарастающим итогом по отправлению, законченным рейсам, отдельным судам, группам судов, отделам и судоходной компании в целом дифференцировано по видам и направлениям перевозок, а также отправителям и договорам.

Контроль по перечисленным позициям производится разностным и индексным способом.

Функция анализ реализуется так же, как и в подсистеме «ГРУЗ». При этом он выполняется непрерывно по мере поступления информации более высокого уровня достоверности по всем временным горизонтам, задачам и показателям, характеризующим производственную деятельность флота, и базируется на методах изолированного влияния факторов в сочетании со статистическими методами обработки рядов динамики. Все факторы, определяющие причины потерь и результатов (доходов) о работе флота, объединяются в группы, характеризующие изменения в составе флота, условия работы, способы организации движения, точности информации. Для оценки влияния факторов вычисляются условные уровни анализируемых показателей с использованием системы моделей, позволяющих учитывать исходные позиции судов, последствие оптимизации планов работы флота, сезонность перевозок, вывод судов из эксплуатации и другие элементы системы показателей и классификационных признаков работы флота.

Реализация функции планирования предполагает на основе информации различного уровня достоверности о грузопотоках, состоянии флота, решение задач и отдельных вопросов, связанных с проектированием работы судов в предстоящем временном периоде.

Планирование работы флота судоходной компании осуществляется непрерывно и базируется на информации, имеющей значительную неоднородность. Следовательно, расчет времени рейсов судов и показателей работы не одинаков в ходе подготовки плановых решений о работе флота. Изменяется состав входных данных, детализация нормативов, степень укрупнения промежуточной и выходной информации.

Ведение базы данных подсистемы «СУДА» предполагает синтез отдельных решений, сформированных на основе «декадной», «месячной», «квартальной», «годовой» и «пятилетней» информации, имеющей различный уровень достоверности [6].

График формируется на базе информации, имеющей «декадный» и «месячный» уровни достоверности. Затем последовательно

осуществляется определение работы флота с использованием «квартальной», «годовой» и «пятилетней» информации об объемах перевозок. Ведение подсистемы при «квартальной» информации основано на моделях (эталонах) рейсов судов.

Структура процесса формирования работы на базе сведений «годового» и «пятилетнего» уровней достоверности имеет вид, соответствующий понятию расстановки типов судов по направлениям их работы. Синтез процесса ведения подсистемы также предполагает взаимосвязь между текущими и новыми (плановыми) рейсами судов, а также производственным и маркетинговым планами.

Решения о назначении судов в рейс принимаются одновременно для нескольких из них (группы) по каждому направлению работы и в целом по отделу, если флот однородной специализации. Исключение составляют суда, имеющие приоритетные условия в работе - закрепленные за линией, направлением и отдельной схемой движения. Организация движения и показатели работы в этом случае устанавливаются сразу на весь период, на который имеется соответствующая информация об условиях их работы.

Неоднородность исходной информации о грузопотоках и условиях предстоящей работы судов вызывает необходимость в формировании параметров варьирования в расчете оптимальной структуры транспортного процесса. Это позволяет в каждом конкретном случае применять соответствующий ему метод поиска интересующего решения. Выделены следующие уровни и параметры варьирования (состав исходных данных и искомых результатов):

а) набор судов и последовательность их ввода в график, композиция грузовых партий, распределяемых по результатам закрепления судов за маршрутами движения, критерий оптимизации работы флота;

б) последовательность работ, выполняемых каждым типом и конкретным судном с указанием вида, объема перевозок и времени на его выполнение;

в) маршрут судна, рейсы, определяемые схемой движения, входящей в маршрут, перевозка между отдельной парой портов погрузки - выгрузки;

г) последовательность портов захода судна в схеме движения, квота грузоподъемности и грузоместимости на каждую пару портов, входящую в схему движения, состав грузов в рамках установленной квоты, состав грузов без предварительного ограничения по квоте, критерии оптимальности схемы движения и загрузки судна;

д) количество груза и состав грузовых партий, требующих перевозки между портами отправления и назначения, входящими в схему движения, рабочий процесс, технологические операции судна в рейсе.

Таким образом, ведение подсистемы обеспечивает эффективное использование сети персональных ЭВМ и опыта эксплуатационника

судоходной компании. Их взаимодействие выражается в том, что эксплуатационник задает параметры варьирования, а затем корректирует полученные результаты работы ЭВМ. Организация такого рода расчетов при ведении подсистемы обусловлена тем, что в ходе выработки и просмотра вариантов сложного управленческого решения принять окончательный вариант легче и быстрее, улучшая уже имеющийся, чем создавать его заново, опираясь только на исходную информацию. Последовательное задание параметров варьирования также значительно снижает размерность решаемой задачи.

Подготовка проекта решений осуществляется на основе комплекса экономико-математических моделей [6]. В отдельных случаях решение по некоторым судам может оказаться неприемлемым, с точки зрения пользователя. Корректировка результатов расчета выполняется, как правило, в следующих случаях:

- время рейса (стояночная его составляющая), эксплуатационные и финансово-валютные показатели не соответствуют действительному состоянию транспортного процесса из-за низкой достоверности нормативно-справочной информации, используемой в расчетах;
- судно не отвечает требованиям, предъявляемым к перевозке и перегрузке закрепленных за ним родов груза - длинномерные, тяжеловесные грузы и т.д.;
- грузовой план составлен таким образом, что предполагается дополнительная перевалка грузов в зависимости от последовательности портов захода в схеме движения судна;
- схема движения и соответствующий ей объем перевозок не позволяет максимально использовать грузоподъемность или грузместимость судна, либо приводит к необходимости дробления грузовых партий.

При ведении подсистемы на основе «декадных» сведений о структуре и объемах перевозок производится подбор и систематизация всей необходимой информации для принятия предварительных решений по назначению судов в очередной рейс. При этом из общего списка выделяются суда, использование которых предварительно согласовано (линейные суда) или задано в директивном порядке. Устанавливается состав исходных данных и искомых результатов (параметров варьирования), интересующих инженера-диспетчера и обеспечивающих, по его мнению, получение требуемого (оптимального) варианта работы судна в соответствии с заданием. Если показатели работы судна отвечают требованиям к его использованию, то рейс заносится в рабочий массив подсистемы. При неудовлетворительных показателях производится их корректировка или осуществляется переход к другому составу параметров варьирования. В том случае, если первоначальная их фиксация в целом удовлетворяет инженера-диспетчера, то дополнительно сокращаются степени свободы в расчетах, проводимых ЭВМ, что

обеспечивает целенаправленное ее действие в поиске оптимального результата. Также возможно расширение степеней свободы и изменение варианта расчета, если первоначальный результат не обеспечил приемлемого использования судна.

Формирование предварительных назначений по остальным судам производится по аналогичной схеме с тем отличием, что их подготовка ведется сразу по всей группе. При этом вариант расчета должен обеспечить большую степень свободы при определении с помощью ЭВМ оптимальной работы судов в предстоящем периоде времени.

Определение работы флота осуществляется на основе экономико-математической модели и методов теории игр и оптимального управления. При этом в ходе формирования графика выполняется прогноз реализации транспортного процесса, то есть с учетом времени и очередности подхода судов в порты, а также производственных их возможностей.

При ведении подсистемы на основе «месячных» сведений устанавливаются позиции судов, объемы перевозок, и проводятся расчеты по назначению судов в рейсы, следующие за графиком, подготовленным с использованием оперативной информации, имеющей «декадный» уровень достоверности. Последовательность, состав и содержание работ по принятию решений о предстоящем использовании судов на основе информации «месячного» уровня достоверности соответствует вышеизложенному. Проект работы флота формируется на базе экономико-математической модели линейного программирования и формально-эвристического метода [7].

При ведении подсистемы на основе информации, имеющей «квартальный», «годовой» и «пятилетний» уровни достоверности, производится расстановка типов судов по направлениям работы, которая предусматривает следующий состав работ:

- определение позиции судов после рейсов, подготовленных на основе информации «месячного», затем «квартального», «годового» уровня достоверности;
- уточняются сроки ремонта, аренды судов и прогноз перевозок по вновь поступившим данным. Выделяются грузопотоки традиционной для паромства номенклатуры грузов;
- определяются направления перевозок, последовательности переходов с одного на другое и устанавливается возможность использования на них отдельных судов.

Исходя из полученных результатов, уточняется загрузка судов, время рейсов, показатели работы по направлениям перевозок.

Расстановка флота производится на основе экономико-математической модели линейного программирования и теории матричных игр [8]. Применение игрового подхода позволяет учитывать конъюнктуру грузового фрахтового рынка.

Наряду с вышеизложенным, расстановка флота на основе «квартальной» и «годовой» информации дает возможность установить соотношение провозной способности и объема транспортной работы. Это, в свою очередь, позволяет вести направленную работу в поиске и привлечении дополнительных грузов, либо в отфрахтовании судов на выгодных для судоходной компании условиях. Расстановка же флота на основе прогнозной «пятилетней» информации позволяет установить перспективные региональные рынки транспортных услуг, а также необходимость пополнения флота, списания и модернизации судов.

Регулирование в подсистеме направлено на корректировку принятых решений по использованию судов и подготовку новых - наращивание информационной базы. При этом выполняются следующие виды работ:

- уточняются сроки готовности грузов и погрузки их на суда;
- анализируются сведения о положении в портах, в которые предполагается подача тоннажа;
- устанавливаются отклонения в ранее принятых датах освобождения судов, выхода их из ремонта, возвращения из экспедиций, аренды и других видов работ;
- анализируются директивные указания вышестоящих организаций и готовятся соответствующие решения по их выполнению;
- проводится оценка влияния различного рода форс-мажорных обстоятельств на работу судов в соответствии с графиком и намечаются пути их преодоления;
- принимаются решения, связанные с планированием работы флота, в связи с необходимостью наращивания информации в подсистеме.

Текущую корректировку информационной базы подсистемы по результатам принятых регулировочных решений предполагается выполнять в том случае, если в силу сложившихся обстоятельств требуется срочная их отмена. В противном случае, изменения накапливаются, систематизируются и вносятся в базу подсистемы с периодичностью, обеспечивающей требуемую актуальность информации.

Таким образом, ведение информационной модели системы управления судоходной компанией реализует формирование, сбор, накопление и корректировку данных, отражающих процессы производственной деятельности судов - перевозки грузов и обработки тоннажа в портах. Функционирование отдельных подсистем «ГРУЗ» и «СУДА» основано на раздельном, но взаимосогласованном ведении баз данных перечисленных процессов. При этом выполняется замещение плановых долгосрочных сведений о состоянии подсистем на уточненные - оперативные, документальные и фактические данные по мере развития процессов и поступления информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Функции и структура органов управления, их совершенствование* /Под ред. Г.Х. Попова. - М.: Экономика, 1973. - 255 с.
2. *Управление по результатам: Пер. с финск. /Общ. ред. и предисловие Я.А. Лейманна.* - М.: Прогресс, 1993. - 320 с.
3. *Громовой Э.П. Автоматизированные системы управления морским транспортом.* - М.: Транспорт, 1981. - 328 с.
4. *Вільям Р. Дункан. Керівництво з основ Проектного Менеджменту. Інститут проектного менеджменту США (PMI).* - К.: Українська асоціація управління проектами, 1999.- 198 с.
5. *Воевудский Е.Н. Управление на морском транспорте.* - М.: Транспорт, 1992. - 375 с.
6. *Шибяев А.Г. Подготовка и обоснование решений по управлению перевозками и работой флота морской судоходной компании.* - Одесса: ОГМУ, ХОРС, 1998. - 197 с. ·
7. *Шибяев А.Г. Эвристическое моделирование графика работы флота //Вісник Одеського державного морського університету.* - Одеса: ОДМУ, Астропринт, 1998. - № 2.- С. 60-65.
8. *Шибяев А.Г. Обобщение и развитие моделей оптимальной расстановки флота морской судоходной компании //Вісник Одеського державного морського університету.* - Одеса: ОДМУ, Астропринт, 1998. - № 2.- С. 66-72.

УДК 656.615/045/

СОГЛАСОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ПО ОПЕРАТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ РАБОТОЙ ФЛОТА И ПОРТОВ В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

А.Г. Шibaев, В.З. Ананьина

Наиболее перспективным в Украине центром, вокруг которого формируется логистический коммуникационный узел, несомненно, является регион портов Одессы, Ильичевска, Южного. Эти перспективы обусловлены нахождением региона на пересечении осей Запад-Восток и Север-Юг и созданием скоростных транспортных коммуникаций между Одессой, Киевом, Крымом, Придунайскими и зарубежными портами (Стамбул, Варна, Констанца).

Формирование транспортных коридоров и соответствующих систем определяют кардинальные изменения в условиях функционирования морского транспорта требуют соответствующего пересмотра теоретических положений в области управления морскими перевозками грузов, работой флота и портов. Прежде всего, это связано с исследованием и разработкой вопросов, обеспечивающих принятие адекватных новым условиям хозяйствования управленческих решений, направленных на повышение эффективности эксплуатации и конкурентоспособности отечественных транспортных предприятий.

Задачи самоорганизации в связи с экономической самостоятельностью морских пароходств, портов и, как следствие этого, возросшей ролью их интересов, приобретают особое значение. В итоге независимые в начале процесса потоки вступают во взаимодействие. Наиболее ярко это выражено в регионе отдельных бассейнов, например, таких как Черноморско-Азовский, Балтийский, где расположено значительное количество пунктов перевалки грузов и судоходных предприятий, среди которых при рыночных отношениях возникает конкуренция. Это приводит к необходимости изучения (прогноза) спроса на транспортную продукцию, оценки производственных мощностей, соответствия их структуре грузопотоков. Поэтому в данных условиях задача формирования и функционирования транспортной сети с учетом интересов отдельных предприятий тесно связана с маркетинговым и производственным планированием, то есть разработкой новых и развитием действующих подходов к оптимизации решений в данной области знаний.

Исследования задач оптимизации транспортных сетей с нелинейными характеристиками за рубежом [1] показывают целесообразность использования:

- метода "ветвей и границ" для сетей, содержащих ~ 25 узлов и ~ 75 дуг;
- процедуры декомпозиции типа метода Бендерса [2] – для сетей ~ 150 узлов и ~ 375 дуг;
- процедуры декомпозиции типа метода Бендерса в сочетании с пошаговым распределением перевозок и эвристическими приемами - для сетей в ~ 2000 узлов и ~ 6000 дуг.

Однако размерность и сроки поиска решений при оперативном управлении производственной деятельностью транспортных предприятий, и особенно при согласовании их действий не позволяют использовать ни один из вышеперечисленных методов.

На оперативном уровне принятия решений рассматриваются конкретные объекты управления транспортными системами и для них проводятся детальные оптимизационные расчеты [3]. На выбор математического аппарата моделирования процессов на этом уровне влияет ряд факторов. К наиболее важным среди них относятся:

- необходимость учета транспортных характеристик грузов (род, партионность, корреспонденция, время поступления), технико-эксплуатационных характеристик и позиций судов;
- большая размерность задач вследствие значительного количества управляемых объектов (судов, грузов);
- необходимость учета динамики процесса функционирования транспортной системы;
- значительный объем вводимой оперативной информации о состоянии управляемых объектов;
- ограниченность во времени на выработку и принятие управленческих решений;
- комбинаторный характер решаемых задач.

Целью настоящей статьи является разработка теоретических основ построения системы моделей по оперативному управлению морскими перевозками грузов, работой флота и портов.

В настоящее время при управлении морским транспортом значительные трудности вызывает составление оперативных планов и графиков работы флота и портов. Существующие методы и модели недостаточно учитывают взаимодействие двух основных элементов транспортного процесса флота и портов.

Предлагаемая система моделей оперативного управления работой флота и портов основана на имитации процессов движения судов и обработки их в портах с учетом влияния стохастических факторов.

Структура процесса работы судов описывается деревом допустимых технологических маршрутов $K_c(A, L)$, которое состоит из непустого множества A , содержащего узлы $a(k)$, дифференцированные по шагам k ($k=0, 1, \dots, T_c-1$), и множества L , характеризующегося совокупностью дуг вида

$$l_{ij}(k+1) = \{a_i(k), a_j(k+1)\},$$

где $a_i(k) a_j(k+1) \in A$,

Шаг k в дереве маршрутов $K_c(A, L)$ - есть этап принятия решения о переходе от одного узла $a_i(k)$ к инцидентному ему другому узлу $a_j(k+1)$ по дуге $l_{ij}(k+1)$. Положение каждого конкретного узла в дереве определяется шагом k и порядковым номером $j(k)$ в множестве узлов, принадлежащих данному шагу. Каждый узел представляет порт захода, в котором судно освобождается от обязательств предыдущего рейса. Вершина $a_i(0)$ есть соответственно порт освобождения судна на начало планового периода. Дерево технологических маршрутов формируется на основе имитационной модели, исходя из структуры плановых грузопотоков на бассейне [4]. Загрузка судов по каждой схеме движения определяется с использованием математической модели линейного целочисленного программирования. Элементы времени рейса при движении судна по схеме устанавливаются с учетом нормативов. На первом этапе расчета оценка стояночного времени судов осуществляется на базе статистических данных о производственных возможностях портов.

В процессе оптимизации графика движения флота осуществляется переход к вероятностным характеристикам работы судов и портов. Это позволяет учесть группу факторов, определяющих характер реализации транспортных операций, в том числе и стохастические. Для сравнительного анализа каждой схемы движения вводится условная вероятность $P_c(l_{ij}(k))$ работы судна по схеме $l_{ij}(k)$. При этом накладываются ограничения:

$$\begin{aligned} &L_i(k) \\ &\sum_{j=1} P_c(l_{ij}(k)) = 1, \quad (1) \\ & \quad \quad \quad (c=1, 2, \dots, m; k = 0, 1, \dots, T_c-1; i = 1, 2, \dots, A(k)); \end{aligned}$$

где $L_i(k)$ - множество вариантов работы судна c , заданных в вершине $a_i(k)$ дерева $K_c(A, L)$;

k - номер шага принятия решений о предстоящей работе судна, $k \in T_c$

T_c - число шагов, характеризующее количество рейсов судна c в плановом периоде.

Тогда математическая модель задачи второго этапа расчетов примет следующий вид:

$$\sum_{k=0}^{T_c-1} \sum_{i=1}^{A(k)} \sum_{j=1}^{L_i(k)} \Phi^c_{ij}(\theta^c_{ij}(k), k) X_i(k) X_{ij}(k) \rightarrow \max; \quad (2)$$

$$X_j(k+1) = X_i(k) X_{ij}(k), \quad (3)$$

$$(k = 0, 1, \dots, T_c - 1; i = 1, 2, \dots, A(k); j = 1, 2, \dots, L_i(k));$$

$$L_i(k) \sum_{j=1} X_{ij}(k) = 1, \quad (4)$$

$$(k = 0, 1, \dots, T_c - 1; i = 1, 2, \dots, A(k));$$

$$X_{ij}(k) \geq 0, \quad (5)$$

$$(k = 0, 1, \dots, T_c - 1; i = 1, 2, \dots, A(k); j = 1, 2, \dots, L_i(k));$$

$$X_i(0) = 1; (i=1). \quad (6)$$

В формулах (2)-(6) приняты следующие обозначения:

$\Phi_{ij}^c(\theta_{ij}(k), k)$ - финансовый результат от работы судна c по схеме $l_{ij}(k)$ на шаге k ;

$X_i(k)$ - вероятность состояния i подпроцесса P_c на шаге k ;

$A(k)$ - множество вершин дерева $K_c(A, L)$ на шаге k ;

$X_{ij}(k)$ - управляющие переменные модели.

Вычисление значений $\Phi_{ij}^c(\theta_{ij}(k), k)$ основано на уравнениях остатка грузопотока r и времени движения судна по схеме $l_{ij}(k)$ в условиях влияния на него $\theta_{ij}(k)$ других судов группы. С помощью этих уравнений уточняется установленная ранее величина загрузки $q_{ij}(k, r)$ грузом r , а также время рейса при работе по схеме движения $l_{ij}(k)$. Затем определение значений финансового результата осуществляется расчетным путем на основе общеизвестных зависимостей.

В итоге устанавливается график движения судов, определяющий время и очередность подхода судов под грузовые операции в порты бассейна

На втором этапе на основе имитационной модели процесса функционирования порта [5] определяются возможные значения дат начала и окончания обработки каждого судна c их вероятностной оценкой $P_c^{обp}(a_i(k))$.

При моделировании учитываются:

- складывающаяся ситуация в порту на текущий момент времени;
- даты подачи судов в соответствии с установленным на первом этапе графиком;
- план завоза экспортных грузов;
- график подачи иностранного тоннажа.

На третьем этапе выполняется оптимизация графика работы флота с использованием модели

$$\sum_{c=1}^m \sum_{j=1}^{L_i(k)} \Phi \{P_c(a_i(k)), P_c(l_{ij}(k+1)), P_c^{обp}(a_i(k))\} \rightarrow \max \quad (7)$$

$$P_c(a_i(k+1)) = f(P_c(a_i(k)), P_c(l_{ij}(k+1))); \quad (8)$$

$$L_i(k) \sum_{j=1} P_c(l_{ij}(k+1)) = 1; \quad (9)$$

$$\left. \begin{matrix} P_c(l_{ij}(k+1)) \\ k=0 \end{matrix} \right\} T_c-1 \quad (10)$$

$$\left. \begin{matrix} P_c(a_i(k)) \\ k=0 \end{matrix} \right\} T_c \quad (11)$$

$$P_c(a_i(0)) - \text{задано} \quad (12)$$

где $\Phi \{P_c(a_i(k)), P_c(l_{ij}(k+1)), P_c^{обп}(a_i(k))\}$ - финансовый результат от работы судна по схеме движения $l_{ij}(k+1)$.

При широкой номенклатуре грузов и большого числа грузовых партий возникает необходимость в агрегировании грузопотоков на первом этапе расчетов. Это позволяет сократить размерность и время решения задачи. После перехода к исходной номенклатуре грузов на четвертом этапе осуществляется распределение грузовых партий между судами, закрепленными за маршрутами. Данная операция выполняется с использованием математической модели линейного целочисленного программирования [6].

На пятом этапе рассчитываются графики обработки судов в портах на основе имитационной модели процесса функционирования порта и уточненной информации о грузах.

Таким образом, рассмотренный подход позволяет эффективно решать следующие задачи управления морским транспортом:

- оптимизация распределения грузопотоков между портами бассейна;
- ведение непрерывного графика работы флота;
- составление графика подачи судов в порты бассейна;
- расчет месячного графика обработки судов в порту.

Предложенные модели могут входить составной частью в диалоговые системы принятия решений, которые снабжены пакетом (библиотекой) вновь разработанных, либо известных моделей и методов, подобранных по принципу близости к предметным задачам, для решения которых предназначена система управления. Это существенно повысит

экономическую эффективность производственных связей субъекта и объектов транспортного процесса, улучшит конечные результаты деятельности морских транспортных предприятий за счет своевременности принимаемых решений и их адекватности проблемам и задачам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Халитов Р.Б., Латыпов Р.А. О задаче распределения грузопотоков по портам перевалки в смешанных сообщениях // Совершенствование планирования и управления на морском транспорте: Сб. науч. тр. СоюзморНИИпроекта. - М., 1982. - С. 60-62.
2. Чужин С.Я. Методы и модели оптимизации процесса завоза экспортных грузов в порты // Вопросы совершенствования методов экономического управления флотом и портами. - М.: В/О Мортехинформреклама, 1986. - С. 59-68.
3. Ананьина В.З., Шостак Е.В. Стимулирующие факторы резервирования трудовых ресурсов в морских портах // Методы та засоби управління розвитком транспортних систем. Зб. наук. праць. - Одесса: ОГМУ, 2001. - №1. - С.153-158.
4. Воевудский Е.Н., Шibaев А.Г. Особенности построения вариантов работы морских грузовых судов // Вісник Одеського державного морського університету. - Одеса: ОДМУ, Астропринт, 1999. - №3. - С.246-254.
5. Дидорчук Н.П. Поход к прогнозированию месячного графика обработки судов в порту // Проблемы экономики, организации и управления на морском транспорте. - М.: ЦРИА «Морфлот», 1982. - С.57-59.
6. Шibaев А.Г. Оптимальное распределение грузовых партий между судами при оперативном планировании работы флота // Экономика и эксплуатация морского транспорта. - М.: ЦРИА «Морфлот», 1981. - С.52-54.

УДК 629.123.56:621.6.036

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ МОРСКОЙ ПЕРЕВОЗКИ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

В.К. Козырев

Морская перевозка сжатых газов, наливом со своей развитой инфраструктурой возникла благодаря потребности трёх гигантов современной экономики – химии, энергетики, сельского хозяйства. В связи с этим флот газозовов развивался достаточно быстрыми темпами (первый в мире специально спроектированный и построенный танкер-газовоз появился в 1953 г. и уже через восемь лет в мире эксплуатировалось свыше 550 газозовов). Однако продолжительное время развитие морской перевозки сжиженных газов (МПСГ) тормозилось мнением о её чрезвычайной опасности. Проблема обеспечения безопасной эксплуатации газозовов, как и атомных реакторов, вызывает повышенный общественный интерес. Диапазон колебаний оценки опасности взрыва на газозове весьма велик – от отрицания повышенной опасности до аналогии со взрывом атомной бомбы. На возможность катастрофических последствий пожара и взрыва на газозове, особенно в порту, указывал «Ллойд лист»: «Взрыв на газозове был бы равен взрыву атомной бомбы» («Морской флот», №6, 1982 г.) из-за колоссального энергосодержания груза сжиженного газа (СГ). Поэтому в разных источниках настоятельно подчеркивается необходимость проведения широких исследований по обеспечению безопасности МПСГ. Эффективный путь снижения реального риска при МПСГ – выяснение точной природы, вида и степени возможной опасности СГ при морской перевозке. В области МПСГ одинаково вредны обе крайности: ажиотаж вокруг опасности СГ и волевое игнорирование или недооценка реально существующего риска при эксплуатации газозовов.

В составе советского флота в разные годы эксплуатировалось 12 газозовов, после обретения Украиной независимости в составе украинского парочодства было 3 газозова. В настоящее время для Украины необходимость проведения исследований по безопасности танкеров-газовозов диктуется двумя соображениями: а) возможностью аварии иностранных газозовов в украинских портах (мировая статистика показывает, что 75% аварий наливных судов приходится на подходы к портам, маневрирование на акватории портов и грузовые операции); б) необходимостью повышения конкурентоспособности украинских моряков на рынках труда.

Из анализа физико-химических свойств и транспортных характеристик грузов, перевозимых на танкерах-газовозах, следует, что МПСГ свойственны: огнеопасность (пожароопасность); взрывоопасность;

повышенная химическая активность грузов; токсичность; воздействие низких температур; способность накопления значительных зарядов статического электричества при технологических операциях; некоторые другие виды опасности. Конкретные вещества или их смеси могут обладать всеми или частью видов опасности в разной степени.

Для обеспечения безопасной перевозки необходимо располагать количественными параметрами оценки и сравнения каждого вида опасности. Качественная и количественная оценка, т. е. определение вида и степени опасности, позволяет произвести сравнительный анализ СГ по критерию опасности и, в перспективе, формализовать задачу выбора оптимальной технологии перевозки.

В работе [5] получена сводная таблица оценки относительной опасности СГ в виде системы эмпирических зависимостей, справедливых в пределах своих граничных условий для каждого из следующих показателей:

1. Нижний концентрационный предел воспламенения, НКПВ, K_H ;
2. Область воспламенения, K_δ ;
3. Температура самовоспламенения, K_C ;
4. Минимальная энергия воспламенения, K_ω ;
5. Токсичность, K_T ;
6. Нормальная скорость горения, K_U ;
7. Максимальное давление взрыва, K_B ;
8. Мощность детонационного взрыва, K_D ;
9. Скорость выгорания жидкой фазы, K_V ;
10. Минимальная взрывоопасная концентрация кислорода, K_a ;
11. Воздействие низких температур, K_X .

Из полученных 11 показателей относительной опасности 9 характеризуют взрывопожароопасность СГ. Сопоставление средней величины показателя взрывопожароопасности K_H с показателями других видов опасности (по токсичности K_T и воздействию низких температур K_X) позволяет сделать вывод о приоритарности того или иного вида опасности для данного СГ. Результаты расчётов представлены в табл. 1.

Примененный метод оценки опасности СГ по разным параметрам по сути дела является эмпирическим исследованием со свойственными ему достоинствами и недостатками. Основной недостаток тот, что полученные значения относительной опасности включают множество параметров, которые лишь косвенно отражают общую опасность СГ. Комплексный подход предполагает, в частности, логическое обоснование системы влияющих параметров и их численных значений (на основании

экспериментальных и расчётных данных), группировку параметров по интересующим видам опасности, выявление существенно важных параметров и классификацию грузов по полученным критериям в зависимости от поставленной исследователями цели.

Таблица 1. Сравнение показателей относительной опасности СГ в относительных безразмерных единицах

Газ	$K_{\text{П}}$	K_{T}	$K_{\text{Х}}$	Преобладающие виды опасности
Аммиак	13,1	35,7	20,4	Токсичность, низкие температуры
Метан	43,2	0,0	100,0	Низкие температуры, огнеопасность
Этан	57,9	0,0	54,7	Низкие температуры, огнеопасность
Пропан	59,5	0,0	25,8	Низкие температуры, огнеопасность
Бутан	62,6	0,0	0,0	Огнеопасность
Этилен	77,7	0,0	64,1	Низкие температуры, огнеопасность
Пропилен	68,4	64,2	29,3	Низкие температуры, огнеопасность
Бутилен	71,9	71,4	3,6	Низкие температуры, огнеопасность
Бутадиен	58,4	71,4	2,5	Токсичность, огнеопасность
Винилхлорид	69,7	96,4	8,3	Токсичность, огнеопасность

В табл. 2 опасность двенадцати различных веществ (столбцы) характеризуется 12 параметрами (строки), из которых первые 10 характеризуют взрывоопасность, 11-й - токсичность, 12-й - опасность воздействия низких температур.

Для приведения всех переменных к единой безразмерной форме матрица наблюдений преобразуется в нормированную матрицу, в которой векторы средних значений столбцов равны нулю, а векторы стандартных отклонений равны 1.

Расчёт производится поэтапно. На первом этапе определяется влияние каждой из 10 первых переменных на взрывопожароопасность. В результате расчётов выявлено, что из пяти существенных наиболее весомый вклад в общую дисперсию (0,578) вносит первая компонента, которая может быть интерпретирована как коэффициент взрывопожароопасности $K_{\text{В}}$. Расчётные значения $K_{\text{В}}$, приведенные в табл. 2, показывают, что наиболее взрывопожароопасными являются бутадиен, бутилен, пропилен, а наименее опасными - аммиак, метан.

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчетов

Номер строки, столбца	Столбцы матрицы		Строки матрицы наблюдений	Размерность	Расчетные значения		
	Вещество	Обозначение вещества			K_B	K_K	K_f
1	Метан	М	Нижний концентрационный предел	% (по объёму)	3,713	0,221	0,2607519
2	Этан	Эт	Разность между верхними и нижними концентрационными пределами	% (по объёму)	-0,023	0,189	0,0039883
3	Пропан	Пр	Температура самовоспламенения	°С	-1,632	0,259	0,0082253
4	н-Бутан	Б _н	Потенциал горения	ккал/моль	-2,895	0,330	0,0154283
5	и-Бутан	Б _и	Минимальная энергия воспламенения	мДж	-2,431	0,323	0,0047137
6	Этилен	Эл	Нормальная скорость горения	м/с	-2,582	-1,335	-3,5323741
7	Пропилен	Пл	Давление взрыва	кПа	-3,063	-0,636	-0,0193474
8	Бутен	Бл	Октановое число	-	-3,587	-0,554	0,0148818
9	Бутадиен	Бг	Скорость выгорания	кг/(м ² мин)	-4,430	-0,637	-0,7048327
10	Аммиак	А	Минимальная взрывобезопасная концентрация кислорода	%	16,983	1,249	0,4582080
11	Винилхлорид	В	Предельно допустимая концентрация (ПДК) вещества в рабочей зоне	мг/м ³	-0,241	-0,498	-
12	Бензин	Б	Температура кипения вещества	°С	0,188	1,085	-

Аналитически зависимость K_B для рассматриваемых веществ от значений их переменных можно выразить в виде

$$K_{B_i} = \sum x_{ij} A_j + 8,685717,$$

где x_{ij} - значение переменных, размерности которых приведены в табл. 2;
 A_j - весовые коэффициенты из табл. 2.

На первом этапе определяется влияние взрывопожароопасности, токсичности и низких температур на комплексный коэффициент безопасности K_K . Для этого в исходной матрице наблюдений в первую строку записываются K_B , во вторую – ПДК, а в третью – температуры кипения веществ, которые близки к температурам их перевозки.

В результате расчёта установлено, что третья главная компонента характеризуется коэффициентом K_K . Его значения для рассматриваемых веществ приведены в табл. 2.

Выражения для определения K_K имеют вид

$$K_K = 0,1096506K_{B_i} + 0,0038903x_{11i} + 0,0051700x_{12i} + 0,516802,$$

где K_{B_i} - значение коэффициента K_B для i -ого вещества;

x_{11i} - значение ПДК i -ого вещества;

x_{12i} - температура кипения i -ого вещества.

Из сравнения коэффициентов K_B и K_K следует, что у таких веществ, как н-Бутан, и-Бутан знак коэффициента K_K меняется по сравнению с K_B . Это объясняется тем, что температуры их хранения и перевозки довольно высоки и почти не влияют на комплексную опасность. В то же время K_K метана ниже, чем бензина, так как метан хранят и перевозят при температуре -161°C , т. е. гораздо меньшей, чем бензин, и здесь сказывается отрицательное воздействие холода на K_K .

У этилена резкое уменьшение K_K объясняется малым значением ПДК (0,5), в то время высокое (около 300) значение ПДК у пропана делает величину K_K для него положительной, хотя K_B отрицательно.

Из сказанного следует, что рассмотренный метод расчета даёт возможность комплексно оценить опасность в зависимости от поставленной цели. Например, для портового строительства целесообразно категорирование рассмотренных грузов по коэффициенту K_B , а для эксплуатации специализированных судов – по коэффициенту K_K .

Организация перевозок и управление работой флота

Ранжировка и классификация веществ по коэффициенту взрывопожаробезопасности K_B приведены ниже.

K_B	16,98	3,7	0,188	-0,023	-0,241	(-1,623)-(-4,43)
Вещество	А	М	Б	Эт	В	Пр, Бн, Эл, Би, Пл, Бл, Бт
Класс (категория)	I		II		III	IV

С практической точки зрения для танкеров-газовозов и береговых терминалов СГ большой интерес представляет исследование мощности источника зажигания (в частности, искрами, которые образуются при размыкании электрической цепи) на концентрационные пределы воспламенения газозвдушной смеси.

Дело в том, что СГ способны образовывать огнеопасные смеси с воздухом при любых температурах и давлениях, возникающих при транспортировке. Значения нижнего и верхнего концентрационного пределов воспламенения (НКПВ и ВКПВ) в воздухе приводятся в литературе для смесей в нормальных условиях (0°C, 101,3 кПа). Но на значения НКПВ и ВКПВ существенное влияние оказывает ряд факторов, в частности, мощность источника зажигания. Результаты многочисленных экспериментов по определению влияния мощности источника зажигания на концентрационную область воспламенения различных смесей носят зачастую эмпирический характер, что затрудняет их использование. Обработка экспериментальных данных зависимости области воспламенения смеси углеводородов от силы тока в цепи позволила выявить характер взаимозависимости анализируемых величин.

В системе координат «сила тока (y) – концентрация смеси (x)» оказалось возможным приближенно связать область воспламенения и силу тока в цепи параболической зависимостью $y = ax^2 + bx + c$, в которой коэффициенты для смесей разных газов имеют значения:

	a	b	c
Метан	0,065	-1,240	6,402
Этан	0,048	-0,720	3,100
Пропан	0,067	-1,005	4,050
Бутан	0,068	-0,800	2,750
Гексан	0,071	-0,530	1,490

Результаты расчётов представлены на рис. 1 и в табл. 3.

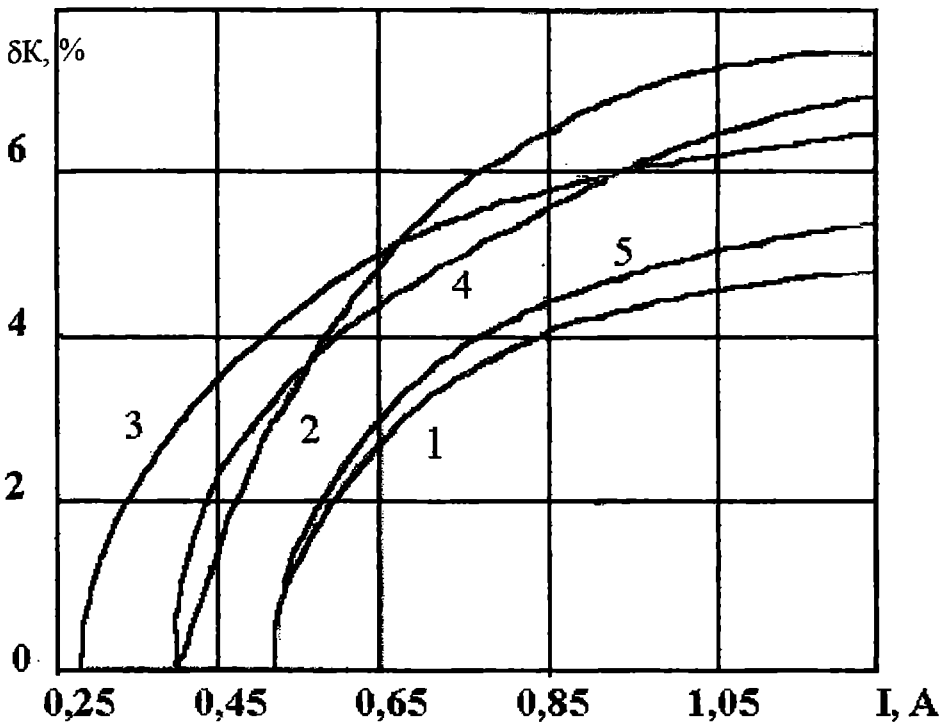


Рис. 1. Зависимость области воспламенения от силы тока в цепи:
1-метан; 2-этан; 3-пропан; 4-бутан; 5-гексан

Таблица 3. Зависимость концентрационных пределов воспламенения от силы тока в цепи

Примеры	Вещество				
	Метан	Этан	Пропан	Бутан	Гексан
$I_{\min}, \text{ а}$	0,49	0,40	0,28	0,39	0,50
$K_{\min}, \% \text{ об.}$	9,20	7,20	7,00	5,5	3,75
$I_{\text{нас}}, \text{ а}$	1,15	1,20	1,25	1,20	1,10
$K_{\text{нас}}, \% \text{ об.}$	7,0-12,0	4,0-11,5	3,3-10,2	2,7-8,5	1,2-6,2
$\delta I = I_{\text{нас}} - I_{\min}, \text{ а}$	0,66	0,80	0,91	0,81	0,60
$\delta K = (B-H)KПВ$	5,0	7,5	6,7	5,8	5,0

В табл. 3 I_{\min} – минимальная сила тока в первичной цепи, необходимая для воспламенения газозвоздушной смеси искрами размыкания;

K_{\min} – концентрация смеси, при которой источник минимальной мощности вызывает воспламенение, является границей искрового зажигания при I_{\min} .

При повышении мощности искры до $I_{\text{нас}}$ область воспламенения расширяется до $K_{\text{нас}}$, дальнейшее увеличение мощности искры не вызывает увеличения области воспламенения. Смысл остальных параметров ясен из таблицы.

Из анализа табл. 3 и кривых на рисунке следует:

1. Минимальная мощность источника воспламенения соответствует пропану, поэтому опасность воспламенения сжиженного нефтяного газа (СНГ) пропорциональна содержанию в его составе пропана.

2. Увеличение в составе СНГ (сжиженных нефтяных газов) тяжелых членов гомологического ряда метана снижает $K_{\text{мин}}$, т. е. увеличивает опасность воспламенения, т. к. снижается концентрационная граница искрового зажигания.

3. Ток насыщения для компонентов СНГ имеет наибольшее значение (1,10-1,25 а) и внутри гомологического ряда колеблется незначительно.

4. С повышением силы тока концентрационная область воспламенения наиболее быстро растёт у этана.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk – IMO, 1983 edition, reprinted 1990. 141 p.*
2. *Captain T.W.V. Woolcott. Liquefied petroleum gas tanker practice. – Glasgow. Brown, son and Ferguson, nautical Publishers 2nd Editions. 1987. 142 p.*
3. *Tanker safety guide (Liquefied gas). – International Chamber of shipping. – London. 1978.*
4. *Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ – М.: Химия, 1981. – 272 с.*
5. *Козырев В.К. Морская перевозка сжиженных газов. – М.: Транспорт, 1986. – 208 с.*

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР И ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ГАЗОВОЗОВ

В.К. Козырев

Современный этап развития морского транспорта характеризуется дальнейшей специализацией и совершенствованием конструкции судов, автоматизацией и централизацией управления судном, усложнением технологических операций при эксплуатации судна, стремлением к повышению производительности оборудования, увеличением количества и пропускной способности различных каналов связи.

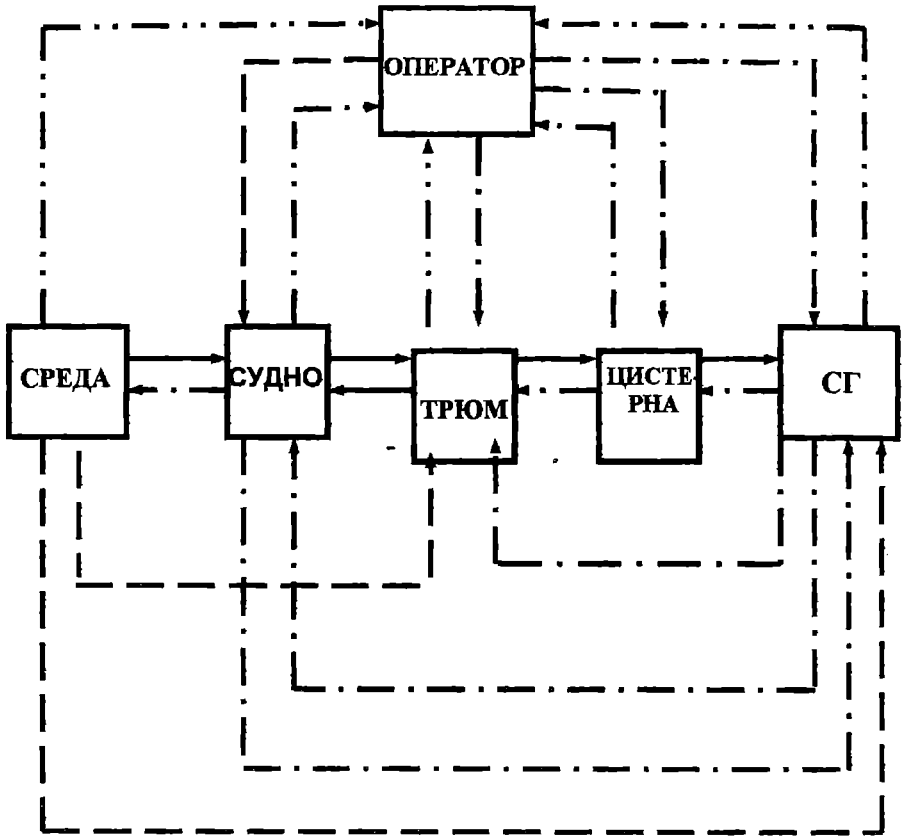
Все это предъявляет повышение требования к человеку, управляющему судном. «Человеческий фактор» становится решающим в обеспечении безопасности и эффективности эксплуатации сложного и дорогостоящего современного специализированного морского судна. С точки зрения эргономики морское судно представляет собой комплексную систему, включающую биологические и технические звенья в качестве действующих подсистем. Система «человек-машина» представляет собой контур регулирования; человек рассматривается как звено системы управления.

С развитием автоматизированных средств управления на морском транспорте меняется характер труда моряков, все более приближаясь к деятельности оператора, находящегося на движущемся объекте. Деятельность оператора в общем виде, место оператора в причинно-следственных связях системы «среда-судно-трюмный воздух-управляющее воздействие» применительно к технологии морской перевозки грузов понятие об устойчивом и неустойчивом состоянии системы, значение оператора в обоих состояниях системы - достаточно исследовано в литературе (труды Зеленина М.П., Бедного Г.З., Стецюка В.Е. и др.).

В контексте исследуемой проблемы (человеческий фактор на газовозе) систему можно интерпретировать в виде, показанном на рис. 1.

В реальных условиях (нормальных или аварийных) оператору в системе «человек-машина-судно» приходится выполнять сложную систему умственных и физических действий в условиях лимита времени. Чем сложнее характеристики управляемых объектов, тем жестче требования к точности (безошибочности) действий оператора и надежности действий оператора в системе управления комплексом «человек-машина», возрастает тяжесть последствий в результате ошибки оператора. Под ошибкой оператора понимается действие или бездействие оператора, которое нарушает возможность дальнейшего функционирования системы или снижает эффективность ее применения. Важность

человеческого фактора в управлении на морских судах подчеркивает тот факт, что 60 % аварий на флоте происходит из-за ошибок людей.



Условные обозначения:

- неуправляемое воздействие;
- - - - - управляемое воздействие;
- · - · - · частично управляемое воздействие;
- · · · · информация о состоянии

Рис. 1. Схема прямых и обратных связей оператора в системе «СРЕДА – СУДНО – ТРЮМ – ЦИСТЕРНА – СГ»

Надежность работы оператора характеризует понятие «отказ». Под отказом оператора понимается такое его действие или бездействие, которое ведет к отклонению выходящих параметров системы за допустимые пределы или к нарушению норм, регламентирующих его работу. Надежность определяет возможность работы оператора определенное время или в экстремальных условиях. Перерождение труда моряков в труд оператора на движущемся объекте вызвало повышение нервно-эмоционального напряжения, нагрузок на центральную нервную систему и весь организм в целом. Все это способствует снижению точности работы оператора (увеличение числа ошибок), снижению надежности (увеличение числа отказов). В этом одна из причин аварийности морских судов.

Танкер-газовоз является морским судном, поэтому экипаж на нем находится в тех же неблагоприятных условиях, что и на обычном судне: единство места труда и отдыха, длительный отрыв от берега и семьи, вынужденное пребывание в замкнутом коллективе, сменность работы с постоянными ночными вахтами, личный риск и т.п.

В то же время танкер-газовоз – узкоспециализированное судно, поэтому условия труда и быта экипажа на нем имеют ряд особенностей, из которых важнейшим является состояние постоянной повышенной нервной напряженности, особенно у командного состава. Причин такого состояния несколько.

Аммиак и углеводородные газы являются токсичными веществами (аммиак в основном раздражающего действия, углеводороды – наркотического). Во время перевозки и в особенности при погрузочно-разгрузочных работах могут создаваться условия, когда трудно предохраниться от вредного воздействия этих веществ. Особенно опасны в этом отношении углеводородные газы, так как при остром отравлении ими сложно прогнозировать реакцию организма, поскольку она зависит от индивидуального состояния центральной нервной системы человека.

Смеси паров перевозимых СГ с воздухом являются взрыво-пожароопасными.

В нормальных условиях эксплуатации груз на борту герметизирован, исправность технологического оборудования гарантирует невозможность образования опасных газозвушных смесей при соблюдении правил технической эксплуатации оборудования. Однако потенциальная опасность пожара или взрыва в аварийных ситуациях существуют, причем смягчить для экипажа последствия такого события – весьма затруднительно. Пока что мировое судоходство не сталкивалось со взрывами катастрофического характера, связанными с эксплуатацией газозвовозов.

Действующие международные правила и предписания по устройству и эксплуатации газозвовозов базируются на опыте работы и анализе причин аварийности береговых предприятий СГ, расчетах

теоретического характера, данных экспериментов и натуральных исследований в производственных условиях. Естественно, малый опыт борьбы с крупными авариями на газовозах не способствует повышению уверенности моряков и эксплуатационников в совершенстве правил (если они есть вообще), предписаний и инструкций, регламентирующих деятельность и быт людей на газовозе.

Другой немаловажной причиной повышенной нервно-психической напряженности человека на борту газовоза является периодически появляющиеся в печати заявления и мнения о чрезвычайной опасности пребывания на газовозе. В частности усматривается, как правило, без убедительных и детальных расчетов аналогия и соизмеримость по своим последствиям взрыва газовоза со взрывом атомной бомбы. Перспектива жизни на атомной бомбе в течение нескольких месяцев в году – не лучший довод в пользу специализации моряков для плавания на газовозах и вообще развития МПСГ.

Проведенные расчеты и исследования подтверждают некорректность такого сравнения. Как показано выше, по ряду показателей газовоз безопаснее обычного танкера, перевозящего ЛВЖ. В то же время бесспорен факт большой потенциальной опасности взрыва при аварийных ситуациях (столкновение судов, разгерметизация груза при посадке на мель). Применительно к танкерам-газовозам возможность образования опасной газоздушнoй смеси, воспламенения ее, перехода горения в тепловой взрыв, возникновения детонации требует детальных и квалифицированных исследований. Учитывая теоретически возможные последствия взрыва газовоза, особенно при стоянке в порту, любые расходы на такие исследования оправданы.

Рассмотренные выше причины повышенной нервной напряженности человека на газовозе объективно имеют место и будут иметь место в будущем. Одна из гарантий безопасности и эффективной эксплуатации танкера-газовоза – тщательно продуманная и четко организованная система подготовки кадров плавсостава газовозов и операторов береговых терминалов. Система подготовки кадров плавсостава для газовозов имеет свои существенные особенности, поэтому регламентируется на международном уровне. В настоящее время сложилась заметная диспропорция в развитии путей обеспечения безопасности морской перевозки опасных наливных грузов. В литературе отмечается, что 80 % аварий судов, перевозящих такие грузы, происходит из-за ошибочных действий членов экипажей и обслуживающего персонала портов. Однако 95-98 % денежных средств расходуется на конструктивные меры повышения безопасности плавания. Такое несоответствие явно ненормально, обеспечение безопасности перевозки требует увеличения средств для повышения квалификации экипажей судов и работников береговых предприятий.

В соответствии с международной конвенцией STCW—78 капитаны, старшие механики, старшие помощники капитана, вторые механики и вторые грузовые помощники капитанов танкеров, перевозящих нефть, химические грузы и СГ, должны пройти подготовку по специальной программе для получения соответствующего сертификата.

Порядок и программа подготовки кадров для газозов на международном уровне определяются рекомендациями Комитета по безопасности на море ИМО. Любая подготовка включает два этапа:

- предварительный инструктаж на берегу или на специально оборудованном учебными средствами судне, во время которого происходит ознакомление с основными принципами обращения с грузом и применение этих принципов при эксплуатации судна;

- дополнительная подготовка и практика на конкретном судне, во время которой приобретаются навыки применения изученных принципов в реальных условиях.

Национальные программы подготовки кадров должны учитывать положения Кодекса ИМО по конструкции и оборудованию судов, перевозящих СГ наливом, и Руководства по безопасности танкеров (сжиженный газ) Международной Палаты Судоходства (газовый код). Подготовка членов экипажей предусматривается на нескольких уровнях: а) для всей команды; б) для капитанов, всех офицеров и рядовых членов, на которых возложены специфичные обязанности и ответственность, связанные с грузом и грузовым оборудованием; в) для тех офицеров, которые несут непосредственную ответственность за груз. Под специфичными обязанностями и ответственностью, связанной с грузом и грузовым оборудованием, понимаются погрузка и выгрузка, мероприятия по обеспечению сохранности, переработке и использованию груза, а также эксплуатация и обслуживание оборудования для выполнения перечисленных операций. Подобный перечень вопросов, входящих в программу подготовки на конкретном уровне, приведен в Рекомендации ИМО, здесь лишь кратко отмечены основные положения.

На уровне «а» предусматривается подготовка по обеспечению общей безопасности и противопожарному режиму на газозове. На уровне «б» предусматривается приобретение основ знаний по обеспечению безопасности газозовов, технологии грузовых операций. Теоретическая часть включает основы химии и физики, важнейшие свойства газов, жидкостей, растворов; токсичность газов и меры первой помощи при отравлении; конструктивные особенности газозовов и грузовых танкеров; местные, национальные и международные правила и предписания; возможные виды опасности для окружающей среды и руководящие документы в этой области. Во время практических занятий на судне изучаются устройство грузовой системы и ее компонентов, система инертных газов; приборы и методы контроля температуры, давления, количества груза; системы газоиндикации, повторного сжижения или

другого использования испаряющегося газа; технология производства грузовых работ; оборудование по обеспечению безопасности людей; действия в аварийных ситуациях.

Подготовка на уровне «в» включает дополнительные тренировки и приобретение опыта по оборудованию судна и его систем, предусматривает знание грузовой системы (системы управления грузом, приборы контроля и регулирования, удаление и использование паров груза, вспомогательные системы, устройства грузовой системы). Обращается внимание на подготовку к действиям в аварийных ситуациях (утечка груза, пожар, столкновение, посадка на мель, экстренная выгрузка), а также на квалифицированные требования, которым должен удовлетворять офицер, несущий непосредственную ответственность за груз и грузовую систему.

По Рекомендациям ИМО выдача соответствующего диплома по окончании подготовки предусмотрена только для офицеров, квалифицирующихся в качестве специалистов, ответственных за груз и грузовую систему.

Подготовка кадров для газозовов имеет ряд особенностей. Во-первых, специфические свойства груза потребовали наличия в составе экипажа новых должностей — рефрижераторного (газового, системного) механиков, которые обеспечивают грузовые операции, поддерживают нужные параметры груза на переходе, несут вахты в помещении поста управления грузовыми операциями (ПУГО). Фактически вся их деятельность связана с обеспечением безопасности и экипажа судна, и берегового терминала. Эти специалисты хотя и принадлежат к комсоставу, но не имеют морской подготовки, что в определенной мере противоречит Рекомендациям ИМО. Во-вторых, специфические свойства груза и его значительная опасность требуют применения сложного технологического оборудования, для обслуживания которого нужны высокая квалификация членов экипажа и большой практический опыт. Если теоретические знания можно получить на курсах в сравнительно короткое время, то приобретение опыта и практических навыков требуют длительного времени и средств. Этим обуславливается чрезвычайная важность проблемы стабильности экипажей и борьбы с текучестью кадров. Один из возможных путей решения проблемы стабильности кадров для газозовов — привлечение с кратковременной переподготовкой моряков танкерного флота. В-третьих, специальные курсы при направлении на газозов должны проходить все члены экипажа, но программы подготовки для разных специалистов должны быть разными. Приняв за основу программу ИМО по уровню подготовки, целесообразно выделить следующие группы: а) капитаны, старшие помощники, электромеханики, радиотехническая служба; судовые врачи; б) главные (старшие) механики, рефрижераторные (газовые, системные) механики, помощники по пожарной части; в) комсостав вахтенной службы

(помощники капитана, механики); г) рядовой состав вахтенной службы; д) остальные члены экипажа.

Для всех групп в основу программы должна быть заложена профилактика возникновения аварийных ситуаций и отработка осознанных действий в таких ситуациях в пределах своей компетенции. Для специалистов по грузовым операциям в силу отмеченной особенности их (они, как правило, не моряки) следует уделять внимание общей морской подготовке. Помимо этого, перед назначением на должность специалисты данной группы должны проплавать дублерами не менее одного рейса с обязательным участием в грузовых операциях.

Для судоводителей целесообразно акцентировать внимание на таких вопросах, связанных с безопасностью мореплавания, как выбор наиболее безопасных по интенсивности судоходства и по погодным условиям маршрутов, изучение специальных рекомендаций по плаванию в сложных условиях (в узкостях, на мелководье, при плохой видимости), взаимодействие с береговыми постами регулирования движения в тех районах, где они имеются, и др. Для старшего командного состава важно знание национальных и местных правил, портовых обычаев и предписаний в пунктах захода в части, касающейся газовозного флота. Необходимо отметить постоянное возрастание требований к профессиональной компетентности и квалификации членов экипажей газовозов. Объясняется это не только соображениями безопасности мореплавания. В портах некоторых стран, в частности США, власти могут подвергнуть опросу любых членов экипажа выборочно по своему усмотрению с целью проверки знаний по обеспечению безопасности на судне во время стоянки в порту. Любое незнание может обернуться неприятностями для судна.

Работники береговых организаций (порт, завод и др.), которым по служебным делам необходимо бывать на газовозе либо на причале, занятом газовозом, должны пройти специальную подготовку по программе, включающей следующие вопросы: физико-химические свойства грузов и виды опасности, свойственные перегружаемым грузам; методы индивидуальной и коллективной защиты при аварийных утечках газа и образовании газоздушных смесей или облака; способы оказания первой медицинской помощи пострадавшим; экстренные действия при обнаружении загорания груза или возникновении другого очага пожара; правила пользования фильтрующими противогазами с коробками соответствующей марки (КД и др.) и воздушными дыхательными аппаратами. Наличие соответствующего свидетельства служит основанием для получения пропуска на судно при стоянке газовоза в порту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klein Hans Ulrich, Schmidt Hans Helmut. *Verfahren und Einricytung Zur Transport von Flussiggas. Consulting Engiheers Gmb H.*
2. Jan E. Johnsen. *Anithing liquid. Hazardous cargo bulletin. 1981.sept.Vol. 2. № 9. P. 12-13.*
3. Jonsen J.E. *Organisation – Qualifications – Safety – An eternal (problem) trangle? „Mari Chem.82: Conf. Mar. Transp., Handl. and Storage Bulk Chem., Amsterdam, June 22-24, 1982” Rickmansworth, 1983. P. 103-106.*
4. *Tanker Safety Guide (liquefied gas). International Chamber of Shipying. London, 1978.*
5. Зеленин М.П. , Бедный Г.З. *Эргономика на морском транспорте.—М.: Транспорт, 1980. – 175 с.*
6. Козырев В.К. *Морская перевозка сжиженных газов. – М.: Транспорт, 1986. - 208 с.*

УДК 62-192:52(031)

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ В ПОЛУМАРКОВСКОЙ СРЕДЕ

Л.В. Москалюк, М.Я. Постан

Введение

В математической теории надежности, последовательная система с восстановлением и экспоненциально распределенными длительностями нахождения в разных состояниях соответствующего марковского процесса, как известно [1], является простейшим примером содержательной с точки зрения приложений системы, расчет характеристик которой не укладывается в схему «размножения и гибели». Расчет её показателей надежности, основанный на составлении и решении системы дифференциальных уравнений Колмогорова, весьма прост. Поэтому представляют теоретический и практический интерес попытки обобщения такой системы с учетом различных дополнительных особенностей её функционирования, например таких:

- а) несколько случайным образом изменяющихся эксплуатационных режимов;
- б) несколько независимо работающих основных элементов с общим резервом;
- в) наличие нескольких ремонтных устройств в системе с резервированием.

Целью настоящей статьи является анализ системы с несколькими восстанавливаемыми элементами, соединенными последовательно, которая может работать в нескольких эксплуатационных режимах. Заметим, что влияние различных режимов использования элементов на показатели их надежности пока еще является малоисследованной областью в теории надежности. Например, в последнем самом полном русскоязычном справочнике по расчету надежности технических систем [2] для освещения этой важной проблемы вообще не нашлось места. К малочисленным и разрозненным публикациям на эту тему можно отнести, например, статьи [3-5] и один из параграфов монографии [6]. Близко примыкающая к данной проблематике теория систем массового обслуживания, работающих в случайных средах, которая имеет обширную библиографию (см., к примеру, [7]), сосредоточена на решении своих специфических задач, слабо корреспондирующих с задачами надежности. Заслуживает также упоминания одна общая вероятностная схема, позволяющая исследовать влияние смены режимов использования элементов на надежность составленных из них систем и основанная на случайной замене времени, которая приведена в книге [8. Гл. X, § 7]. Удобным математическим аппаратом для описания смены режимов

эксплуатации является цепь Маркова с полумарковским управлением [9-11].

Современный уровень развития указанного направления математической теории надежности не может считаться удовлетворительным, поскольку априори ясно, что износ и старение узлов, деталей, элементов технических систем существенным образом зависят от режимов их эксплуатации.

Перейдем к математической постановке и решению задачи. Ниже мы ограничимся изучением двух видов последовательных систем со случайной сменой режимов эксплуатации: *последовательной системы без резервирования* и *системы однотипных элементов с общим ненагруженным резервом*.

1. Последовательная система без резервирования

Пусть имеется система, состоящая из n последовательно соединенных элементов, подверженных внезапным отказам. Вся система целиком в любой момент времени может эксплуатироваться в одном из R режимов. В i -м режиме k -й эксплуатируемый элемент в интервале $(t, t + \Delta t)$ подвержен отказу с вероятностью $\lambda_{ik} \Delta t + o(\Delta t)$ независимо от предыдущих отказов. После отказа он немедленно начинает восстанавливаться, причем время ремонта – случайная величина θ_{ik} с функцией распределения (ф.р.) $B_{ik}(t)$ (при условии, что отказ наступил в i -м режиме эксплуатации), $B_{ik}(+0) = 0$. В течение времени ремонта элемента смены эксплуатационных режимов не происходит, и после восстановления элемент продолжает использоваться в том же режиме, в котором он отказал. При условии, что система работоспособна (т.е. что исправны все n элементов) процесс смены режимов эксплуатации описывается полумарковским процессом $Y(t)$ с полумарковской матрицей вида $\|\pi_{ij} A_i(t)\|$, где $A_i(t)$ – ф.р. длительности i -го режима, $A_i(+0) = 0$; π_{ij} – вероятность перехода из i -го режима в j -й.

Марковскую цепь с матрицей $\|\pi_{ij}\|$ считаем неприводимой и, кроме того, предполагается, что в нерабочем состоянии элементы не отказывают.

Для изучения данной системы воспользуемся аппаратом линейчатых марковских процессов [6]. Введем следующие условные обозначения:

$\eta(t)$ – время, прошедшее с момента последней смены состояния процессом $Y(t)$ до момента t ;

$v(t)$ - дискретный случайный процесс, принимающий значения $0, 1, 2, \dots, n$; значение $v(t)=0$ соответствует работоспособному состоянию системы; $v(t)=k$, $k=1, 2, \dots, n$ соответствует состоянию, когда k -й элемент отказал и находится на восстановлении;

$$p_{i0}(x, t)dx = \mathbf{P} \{x < \eta(t) < x + dx, v(t) = 0, Y(t) = i\},$$

$$p_{ik}(x, y, t)dx dy = \mathbf{P} \{x < \eta(t) < x + dx, y < \theta_{ik} < y + dy, v(t) = k, Y(t) = i\},$$

$$q_{i0}(x, t) = \frac{p_{i0}(x, t)}{(1 - A_i(x))},$$

$$q_{ik}(x, y, t) = \frac{p_{ik}(x, y, t)}{(1 - A_i(x))(1 - B_{ik}(y))}.$$

Плотности $p_{i0}(x, t)$, $p_{ik}(x, y, t)$ предполагаются непрерывными функциями, а ф.р. $A_i(t)$, $B_{ik}(t)$ - абсолютно непрерывными.

С помощью обычных вероятностных рассуждений [6, 9] для изучаемой системы можно вывести систему дифференциальных уравнений и граничных условий для нахождения неизвестных функций $q_{i0}(x, t)$, $q_{ik}(x, y, t)$.

По формуле полной вероятности имеем для малых Δt

$$p_{i0}(x + \Delta t, t + \Delta t) = (1 - \lambda_i \Delta t) p_{i0}(x, t) \frac{1 - A_i(x + \Delta t)}{1 - A_i(x)} +$$

$$+ \sum_{k=1}^n \int_0^{\infty} p_{ik}(x, y, t) \frac{B_{ik}(y + \Delta t) - B_{ik}(y)}{1 - B_{ik}(y)} dy + o(\Delta t),$$

$$p_{ik}(x, y + \Delta t, t + \Delta t) = p_{ik}(x, y, t) \frac{1 - B_{ik}(y + \Delta t)}{1 - B_{ik}(y)} + o(\Delta t),$$

$$\int_0^{\infty} p_{ik}(x, y, t + \Delta t) dy =$$

$$= p_{i0}(x, t) \lambda_{ik} \Delta t + \int_0^{\infty} p_{ik}(x, y, t) \frac{1 - B_{ik}(y + \Delta t)}{1 - B_{ik}(y)} dy + o(\Delta t),$$

где

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^n \lambda_{ik};$$

$o(\Delta t)$ - бесконечно малая величина высшего порядка малости по сравнению с Δt .

Для дальнейших преобразований нам понадобится следующий результат (см. [12. С. 112]): для непрерывной функции $g(x)$ и функции с ограниченной вариацией $F(x)$ справедлива формула

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_0^{\infty} g(x) \frac{F(x+\varepsilon) - F(x)}{\varepsilon} dx = \int_0^{\infty} g(x) dF(x).$$

После перегруппировки членов, деления обеих частей вышеприведенных асимптотических равенств на Δt и перехода к пределу при $\Delta t \rightarrow +0$ (с учетом указанного утверждения) придем к следующим уравнениям:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \right) q_{i0}(x, t) = -\lambda_i q_{i0}(x, t) + \sum_{k=1}^n \int q_{ik}(x, y, t) dB_{ik}(y), \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \right) q_{ir}(x, y, t) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\infty} p_{ik}(x, y, t) dy = \lambda_{ik} p_{i0}(x, t) - \int_0^{\infty} p_{ik}(x, y, t) \frac{dB_{ik}(y)}{1 - B_{ik}(y)}. \quad (3)$$

Выведем теперь граничные условия для системы (1)-(3). Имеем равенство

$$p_{i0}(0, t + \Delta t) = \int \sum_{j=1}^R \pi_{ji} \frac{A_j(x + \Delta t) - A_j(x)}{1 - A_j(x)} p_{j0}(x, t) dx + o(\Delta t).$$

Переходя в последнем равенстве к пределу при $\Delta t \rightarrow +0$, получим

$$q_{i0}(0, t) = \int \sum_{j=1}^R \pi_{ji} q_{j0}(x, t) dA_j(x), \quad i = 1, 2, \dots, R, \quad (4)$$

(мы учли здесь, что $p_{i0}(0, t) = q_{i0}(0, t)$).

К уравнениям (1)-(4) необходимо также добавить условие нормировки

$$\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^R \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q_{ik}(x, y, t) (1 - A_i(x))(1 - B_{ik}(y)) dx dy +$$

$$+ \sum_{i=1}^R \int_0^{\infty} q_{i0}(x, t) (1 - A_i(x)) dx = 1. \quad (5)$$

Для практических целей обычно интерес представляет стационарное распределение вероятностей процесса $(Y(t), \nu(t), \eta(t))$, т.е. такое распределение, которое удовлетворяет соотношениям (для всех t)

$$q_{i0}(x, t) = q_{i0}(x),$$

$$q_{ik}(x, y, t) = q_{ik}(x, y),$$

$$x \geq 0, \quad y \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, R, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Для нахождения стационарного распределения из (1)-(5) вытекает следующая граничная задача для системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{d}{dx} q_{i0}(x) = -\lambda_i q_{i0}(x) + \sum_{k=1}^n \int_0^{\infty} q_{ik}(x, y) dB_{ik}(y), \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} q_{ik}(x, y) = 0, \quad x > 0, \quad y > 0, \quad (7)$$

$$\lambda_{ik} q_{i0}(x) = \int_0^{\infty} q_{ik}(x, y) dB_{ik}(y), \quad x > 0, \quad i = 1, 2, \dots, R, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad (8)$$

$$q_{i0}(0) = \int_0^{\infty} \sum_{j=1}^R \pi_{ji} q_{j0}(x) dA_j(x), \quad i = 1, 2, \dots, R, \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^R \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q_{ik}(x, y) (1 - A_i(x))(1 - B_{ik}(y)) dx dy +$$

$$+ \sum_{i=1}^R \int_0^{\infty} q_{i0}(x) (1 - A_i(x)) dx = 1. \quad (10)$$

Суммируя уравнения (8) по k , получим

$$\lambda_i q_{i0}(0) = \int_0^{\infty} \sum_{k=1}^n q_{ik}(x, y) dB_{ik}(y), \quad i = 1, 2, \dots, R.$$

Сравнивая это соотношение с уравнением (6), находим

$$\frac{d}{dx} q_{i0}(x) = 0,$$

откуда

$$q_{i0}(x) = q_{i0}(0). \quad (11)$$

Из уравнения (7) следует, что

$$q_{ik}(x, y) = q_{ik}(x, 0). \quad (12)$$

Используя равенство (12), из (8) получим

$$\lambda_{ik} q_{i0}(x) = q_{i0}(x, 0),$$

или, учитывая (11),

$$\lambda_{ik} q_{i0}(0) = q_{i0}(x, 0). \quad (13)$$

Подстановка равенства (11) в левую часть системы уравнений (9) приводит к линейной системе уравнений относительно величин $q_{i0}(0)$

$$q_{i0}(0) = \sum_{j=1}^R \pi_{ji} q_{j0}(0), \quad i = 1, 2, \dots, R. \quad (14)$$

Наконец, подстановка соотношений (12) и (13) в условие нормировки (10) дает уравнение

$$\sum_{i=1}^R \alpha_i q_{i0}(0) \sum_{k=1}^n \lambda_{ik} \beta_{ik} + \sum_{i=1}^R \alpha_i q_{i0}(0) = 1, \quad (15)$$

где $\alpha_i = \int_0^{\infty} (1 - A_i(x)) dx$; $\beta_{ik} = \int_0^{\infty} (1 - B_{ik}(y)) dy$,

причем все математические ожидания α_i , β_{ik} предполагаются конечными.

Соотношения (11)-(15) решают задачу определения стационарного распределения вероятностей изучаемой последовательной системы. Отметим, что одно из уравнений системы (14) может быть отброшено, поскольку эти уравнения линейно зависимы.

С помощью найденного решения можно определить основные характеристики последовательной системы, а именно:

а) вероятность того, что восстанавливается k -й элемент и используется i -й режим

$$P_{ik} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q_{ik}(x, y) (1 - A_i(x)) (1 - B_{ik}(y)) dx dy = q_i(0) \alpha_i \beta_{ik};$$

б) стационарный коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = \sum_{i=1}^R \int_0^{\infty} q_{i0}(x) (1 - A_i(x)) dx = \sum_{i=1}^R \alpha_i q_{i0}(0);$$

в) вероятность использования i -го режима эксплуатации

$$P_i = \int_0^{\infty} q_{i0}(x) (1 - A_i(x)) dx + \\ + \sum_{k=1}^n \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q_{ik}(x, y) (1 - A_i(x)) (1 - B_{ik}(y)) dx dy = \\ = \alpha_i q_{i0}(0) \left(1 + \sum_{k=1}^n \lambda_{ik} \beta_{ik} \right);$$

г) если через Π_i обозначить производительность системы при условии, что она работает в i -м режиме, то средняя производительность системы составит

$$\bar{\Pi} = \sum_{i=1}^R p_i \Pi_i.$$

Отметим частный случай, когда имеются только два эксплуатационных режима, т.е. $R=2$. В этом случае оба режима поочередно сменяются через случайные промежутки времени и решение системы уравнений (14), (15) имеет вид

$$q_{10}(0) = q_{20}(0),$$

$$q_{10}(0) = \left[\sum_{i=1}^2 \alpha_i \sum_{k=1}^n \lambda_{ik} \beta_{ik} + \sum_{i=1}^2 \alpha_i \right]^{-1}$$

Представляет также интерес выражение для ф.р. фактической длительности τ_i i -го режима эксплуатации (с учетом возможных

прерываний на восстановление отказавших элементов). Эта ф.р. имеет следующий вид:

$$H_i(t) = e^{-\lambda_i t} \sum_{k_1=0}^{\infty} \dots \sum_{k_n=0}^{\infty} \frac{(\lambda_{i1} t)^{k_1} \dots (\lambda_{in} t)^{k_n}}{k_1! \dots k_n!} \times \int_0^t B_{i1}^{(k_1)} * \dots * B_{in}^{(k_n)}(t-\tau) dA_i(\tau), \quad (16)$$

где $B_{ik}^{(m)}(t)$ - m -кратная свертка ф.р. $B_{ik}(t)$ с собой, $B_{ik}^{(0)}(t) \equiv 1$;

* - символ свертки Стильеса.

Эта формула получена с помощью таких же вероятностных рассуждений, которые используются при анализе одноканальной системы массового обслуживания с ненадежным в занятом состоянии каналом обслуживания (см. [6]), а также с учетом того обстоятельства, что в рабочем состоянии в i -м режиме система отказывает из-за выхода из строя k -го элемента с вероятностью λ_{ik}/λ_i независимо от других элементов. Таким образом, согласно полиномиальной схеме задачи о повторении независимых испытаний, с вероятностью

$$\left(\frac{\lambda_{i1}}{\lambda_i}\right)^{k_1} \dots \left(\frac{\lambda_{in}}{\lambda_i}\right)^{k_n} \frac{(k_1 + \dots + k_n)! (\lambda_i t)^{k_1 + \dots + k_n}}{k_1! \dots k_n! (k_1 + \dots + k_n)!} e^{-\lambda_i t}$$

в интервале $(0, t)$ наступит k_1 отказов 1-го элемента, k_2 отказов 2-го элемента, ..., k_n отказов n -го элемента.

В терминах преобразования Лапласа-Стилтьеса формула (16) примет вид

$$h_i(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dH_i(t) = \alpha_i(s + \lambda_i - \lambda_{i1}\beta_{i1}(s) - \dots - \lambda_{in}\beta_{in}(s)), \quad (17)$$

где

$$\alpha_i(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dA_i(t), \quad \beta_{ik}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dB_{ik}(t), \quad \text{Re } s \geq 0.$$

Используя формулу (17), легко вычислять моменты распределения случайной величины τ_i , например,

$$M \tau_i = -h'_i(0) = 1 + \sum_{k=1}^n \lambda_{ik} \beta_{ik},$$

$$M \tau_i^2 = h''_i(0) = \alpha_i^{(2)} \left(1 + \sum_{k=1}^n \lambda_{ik} \beta_{ik} \right)^2 + \alpha_i \sum_{k=1}^n \lambda_{ik} \beta_{ik}^{(2)},$$

где

$$\alpha_i^{(2)} = \int_0^{\infty} x^2 dA_i(x) < \infty, \quad \beta_{ik}^{(2)} = \int_0^{\infty} y^2 dB_{ik}(y) < \infty.$$

2. Система однотипных элементов с общим ненагруженным резервом

Исследуем теперь случай, когда последовательная система содержит m идентичных элементов, находящихся в ненагруженном резерве. В такой системе на место отказавшего основного элемента мгновенно ставится один из резерва, а отказавший элемент поступает в единственное ремонтное устройство для восстановления. В целях упрощения анализа примем дополнительно следующие допущения:

1) интенсивность потока отказов всех n работающих в i -м режиме элементов равна $n\lambda_i$, $i = 1, 2, \dots, R$;

2) время восстановления любого элемента подчиненно показательному закону распределения с параметром μ .

Таким образом, система отказывает только в том случае, когда на восстановлении окажется ровно $m+1$ элементов. Как и прежде, считаем, что в состоянии отказа системы смены режимов ее не происходит и возобновление ее работоспособного состояния начинается в том же режиме, в котором она попала в состояние отказа. В отношении закономерностей смены режимов сохраняется предположение об их полумарковском характере, когда система работоспособна.

Пусть теперь $\nu(t)$ означает число отказавших элементов в момент времени t и обозначим

$$p_{ik}(x, t) dx = P\{x < \eta(t) < x + dx, Y(t) = i, \nu(t) = k\},$$

считая, что $p_{ik}(x, t)$ - непрерывные функции.

Для малых Δt справедливы следующие асимптотические равенства:

$$p_{ik}(x + \Delta t, t + \Delta t) = \left[1 - (n\lambda_i + \mu e(k)\Delta t) \right] p_{ik}(x, t) \frac{1 - A_i(x + \Delta t)}{1 - A_i(x)} + \mu p_{i, k+1}(x, t) \Delta t + n\lambda_i e(k) p_{i, k-1}(x, t) + o(\Delta t),$$

$i = 1, 2, \dots, R; k = 1, 2, \dots, m;$

$$p_{i,m+1}(x, t + \Delta t) = (1 - \mu \Delta t) p_{i,m+1}(x, t) + n \lambda_i p_{i,m}(x, t) + o(\Delta t),$$

где $e(k) = 1$, если $k > 0$; $e(0) = 0$.

После обычных преобразований и перехода к пределу при $\Delta t \rightarrow +0$ отсюда получаем следующую систему дифференциальных уравнений относительно функций $q_{ik}(x, t) = p_{ik}(x, t) / (1 - A_i(x))$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \right) q_{ik}(x, t) &= - (n \lambda_i + \mu e(k)) q_{ik}(x, t) + \\ &+ n \lambda_i q_{i,ik}(x, t) + \mu q_{i,k+1}(x, t), \quad k = 0, 1, \dots, m; x > 0; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} q_{i,m+1}(x, t) = - \mu q_{i,m+1}(x, t) + n \lambda_i q_{im}(x, t), \quad i = 1, 2, \dots, R.$$

Граничные условия для системы (18) задаются равенствами (см. (4)):

$$q_{ik}(0, t) = \int \sum_{j=1}^{\infty} \pi_{ji} q_{jk}(x, t) dA_j(x), \quad k = 0, 1, \dots, m+1, \quad (19)$$

а условие нормировки имеет вид

$$\int \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=1}^R q_{ik}(x, t) (1 - A_i(x)) dx = 1. \quad (20)$$

Для нахождения стационарных характеристик последовательной системы с резервированием $\{q_{ik}(x)\}$ из (18)-(20) вытекает следующая граничная задача для системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} q_{ik}(x) &= - (n \lambda_i + \mu e(k)) q_{ik}(x) + \\ &+ n \lambda_i e(k) q_{i,k-1}(x) + \mu q_{i,k+1}(x), \quad k = 0, 1, \dots, m; x > 0, \end{aligned} \quad (21)$$

$$0 = - \mu q_{i,m+1}(x) + n \lambda_i q_{im}(x), \quad i = 1, 2, \dots, R, \quad (22)$$

$$q_{ik}(0) = \int \sum_{j=1}^{\infty} \pi_{ji} q_{jk}(x) dA_j(x), \quad k = 1, 2, \dots, m+1, \quad (23)$$

где $\bar{q}_i(x) = (q_{i0}(x), \dots, q_{im}(x))^T$; T - символ транспонирования. Общее решение данной системы можно представить следующим образом (см. [14. С. 231-235]):

$$q_{ik}(x) = \sum_{l=0}^m \sum_{r=1}^{m+1} q_{il}(0) \frac{M_{il}(\omega_{ir}) M_{ik}(\omega_{ir})}{(n\lambda_i)^l \mu^k L_{im}(\omega_{ir})} e^{\omega_{ir} x}; \quad 0 \leq k \leq m, \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} M_{i0}(x) &= 1, & M_{i1}(x) &= x + n\lambda_i; \\ M_{i,k+1}(x) &= (x + n\lambda_i + \mu) M_{ik}(x) - n\lambda_i \mu M_{i,k-1}(x), \\ &0 < k < m, & & (27) \\ M_{i,m+1}(x) &= (x + \mu) M_{im}(x) - n\lambda_i \mu M_{i,m-1}(x). \\ L_{im}(x) &= \sum_{l=0}^m \frac{M_{il}^2(x)}{(n\lambda_i \mu)^l}, & i &= 1, 2, \dots, R; \end{aligned}$$

ω_{ir} - корни (действительные и различные) многочлена $M_{i,m+1}(x)$.

Можно показать, что все корни ω_{ir} неположительны. Действительно, это необходимо в силу требования сходимости несобственных интегралов в (23), (25).

Функции $M_{ik}(x)$ выражаются через многочлены Чебышева 2-го рода $U_k(z)$:

$$M_{i1}(x) = -\mu + U_1(z) \sqrt{n\lambda_i \mu},$$

$$M_{ik}(x) = (n\lambda_i \mu)^{k/2} \left[U_k(z) - \frac{\mu}{\sqrt{n\lambda_i \mu}} U_{k-1}(z) \right], \quad k = 2, 3, \dots, m;$$

$$\begin{aligned} M_{i,m+1}(x) &= (n\lambda_i \mu)^{m/2} \left[(-n\lambda_i + 2z \sqrt{n\lambda_i \mu}) U_m(z) + \right. \\ &\left. + 2\mu z U_{m-1}(z) + \mu U_{m-2}(z) \right], \end{aligned}$$

где $z = \frac{x + \mu + n\lambda_i}{2\sqrt{n\lambda_i \mu}}$.

Подстановка решения (26) в граничные условия (23) и в условие нормировки (25) приводит к системе линейных уравнений относительно неизвестных постоянных (одно из уравнений (23) следует отбросить).

После определения всех констант $q_{ik}(0)$ можно вычислить ряд показателей, характеризующих эффективность работы системы. Например, стационарный коэффициент готовности дается формулой

$$K_{\Gamma} = 1 - \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^R q_{i,m+1}(x) (1 - A_i(x)) dx = 1 - \frac{n}{\mu} \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^R \lambda_i q_{im}(x) (1 - A_i(x)) dx,$$

а стационарная вероятность использования i -го режима эксплуатации равна

$$p_i = \sum_{k=0}^{m+1} \int_0^{\infty} q_{ik}(x) (1 - A_i(x)) dx.$$

Рассмотрим пример, соответствующий случаю $m=1$ (один резервный элемент) и $R=2$, $\pi_{12} = \pi_{21} = 1$ (два чередующихся режима эксплуатации системы). Из (27) имеем

$$M_{i2}(x) = (n\lambda_i \mu)^{1/2} \left[(-n\lambda_i + 2z\sqrt{n\lambda_i \mu}) U_1(z) - 2\mu z \right].$$

Корни этого квадратного трехчлена равны

$$\omega_{i1} = -(\mu + n\lambda_i), \quad \omega_{i2} = 0, \quad i=1,2. \quad (28)$$

Поэтому

$$L_{i1}(\omega_{i1}) = 1 + \frac{\mu}{n\lambda_i}, \quad L_{i2}(\omega_{i2}) = 1 + \frac{n\lambda_i}{\mu}, \quad i=1,2. \quad (29)$$

С учетом (28), (29) из (26) получим

$$\begin{aligned}
 q_{10}(x) &= \frac{q_{10}(0)}{\mu + n\lambda_1} \left(\mu + n\lambda_1 e^{-(\mu+n\lambda_1)x} \right) + \\
 &+ \frac{q_{11}(0)\mu}{\mu + n\lambda_1} \left(1 - e^{-(\mu+n\lambda_1)x} \right), \\
 q_{11}(x) &= \frac{q_{10}(0)n\lambda_1}{\mu + n\lambda_1} \left(1 - e^{-(\mu+n\lambda_1)x} \right) + \\
 &+ \frac{q_{11}(0)}{\mu + n\lambda_1} \left(n\lambda_1 + \mu e^{-(\mu+n\lambda_1)x} \right), \\
 q_{20}(x) &= \frac{q_{20}(0)}{\mu + n\lambda_2} \left(\mu + n\lambda_2 e^{-(\mu+n\lambda_2)x} \right) + \\
 &+ \frac{q_{21}(0)\mu}{\mu + n\lambda_2} \left(1 - \mu e^{-(\mu+n\lambda_2)x} \right), \\
 q_{21}(x) &= \frac{q_{20}(0)n\lambda_2}{\mu + n\lambda_2} \left(1 - e^{-(\mu+n\lambda_2)x} \right) + \\
 &+ \frac{q_{21}(0)}{\mu + n\lambda_2} \left(n\lambda_2 + \mu e^{-(\mu+n\lambda_2)x} \right),
 \end{aligned} \tag{30}$$

Граничные условия (23) и условие (25) в данном случае будут иметь вид

$$\begin{aligned}
 q_{10}(0) &= \int_0^{\infty} q_{20}(x) dA_2(x), \\
 q_{11}(0) &= \int_0^{\infty} q_{21}(x) dA_2(x), \\
 q_{20}(0) &= \int_0^{\infty} q_{10}(x) dA_1(x), \\
 q_{21}(0) &= \int_0^{\infty} q_{11}(x) dA_1(x), \\
 &+ \int_0^{\infty} [q_{21}(x)(1 - A_1(x)) + q_{22}(x)(1 - A_2(x))] dx = 1.
 \end{aligned} \tag{31}$$

С учетом уравнений (22) последнее условие можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & (q_{10}(0) + q_{11}(0))\alpha_1 + (q_{20}(0) + q_{21}(0))\alpha_2 + \\
 & + \frac{n}{\mu} \int_0^{\infty} [\lambda_1 q_{11}(x)(1 - A_1(x)) + \lambda_2 q_{21}(x)(1 - A_2(x))] dx = 1. \quad (32)
 \end{aligned}$$

Подставив найденные выражения для $q_{ik}(x)$, задаваемые формулами (30), в равенства (31), (32), получим окончательно следующую систему уравнений (одно из условий (31) мы не использовали):

$$\begin{aligned}
 & -(\mu + n\lambda_2)q_{10}(0) + [\mu + n\lambda_2\alpha_2(\mu + n\lambda_2)]q_{20}(0) + \\
 & + \mu[1 - \alpha_2(\mu + n\lambda_2)]q_{21}(0) = 0, \\
 & -(\mu + n\lambda_2)q_{11}(0) + n\lambda_2[1 - \alpha_2(\mu + n\lambda_2)]q_{21}(0) + \\
 & + [n\lambda_2 + \mu\alpha_2(\mu + n\lambda_2)]q_{22}(0) = 0, \\
 & -(\mu + n\lambda_1)q_{21}(0) + n\lambda_1[1 - \alpha_1(\mu + n\lambda_1)]q_{10}(0) + \\
 & + [n\lambda_1 + \mu\alpha_1(\mu + n\lambda_1)]q_{11}(0) = 0, \\
 & q_{10}(0) \left\{ \alpha_1 + \frac{(n\lambda_1)^2}{\mu(\mu + n\lambda_1)} \left[\alpha_1 - \frac{1 - \alpha_1(\mu + n\lambda_1)}{\mu + n\lambda_1} \right] \right\} + \\
 & + q_{11}(0) \left\{ \alpha_1 + \frac{n\lambda_1}{\mu(\mu + n\lambda_1)} \left[n\lambda_1\alpha_1 + \mu \frac{1 - \alpha_1(\mu + n\lambda_1)}{\mu + n\lambda_1} \right] \right\} + \\
 & + q_{20}(0) \left\{ \alpha_2 + \frac{(n\lambda_2)^2}{\mu(\mu + n\lambda_2)} \left[\alpha_2 - \frac{1 - \alpha_2(\mu + n\lambda_2)}{\mu + n\lambda_2} \right] \right\} + \\
 & + q_{21}(0) \left\{ \alpha_2 + \frac{n\lambda_2}{\mu(\mu + n\lambda_2)} \left[n\lambda_2\alpha_2 + \mu \frac{1 - \alpha_2(\mu + n\lambda_2)}{\mu + n\lambda_2} \right] \right\} = 1,
 \end{aligned}$$

где $\alpha_i(s) = \int_0^{\infty} e^{-sx} dA_i(x), \quad i=1, 2.$

Для данного частного случая коэффициент готовности равен

$$\begin{aligned}
 K_G = & 1 - q_{10}(0) \frac{(n\lambda_1)^2}{\mu(\mu+n\lambda_1)} \left[\alpha_1 - \frac{1-\alpha_1(\mu+n\lambda_1)}{\mu+n\lambda_1} \right] - \\
 & - q_{11}(0) \frac{n\lambda_1}{\mu(\mu+n\lambda_1)} \left[n\lambda_1\alpha_1 + \mu \frac{1-\alpha_1(\mu+n\lambda_1)}{\mu+n\lambda_1} \right] - \\
 & - q_{20}(0) \frac{(n\lambda_2)^2}{\mu(\mu+n\lambda_2)} \left[\alpha_2 - \frac{1-\alpha_2(\mu+n\lambda_2)}{\mu+n\lambda_2} \right] - \\
 & - q_{21}(0) \frac{n\lambda_2}{\mu(\mu+n\lambda_2)} \left[n\lambda_2\alpha_2 + \mu \frac{1-\alpha_2(\mu+n\lambda_2)}{\mu+n\lambda_2} \right].
 \end{aligned}$$

Приведенные выше результаты показывают, что аналитические методы исследования последовательной системы из ненадежных восстанавливаемых элементов, длительности безотказной работы и восстановления которых в фиксированном режиме эксплуатации подчинены показательным законам распределения, причем смена режимов эксплуатации описывается полумарковским процессом с конечным множеством состояний, позволяют довести расчет основных показателей надежности до стандартных численных алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Б.А., Ушаков И.А. *Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики*. М.: Сов. радио, 1975. – 471 с.
2. *Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И.А. Ушакова*. – М.: Радио и связь, 1985. – 606 с.
3. Висков О.В. *О времени жизни системы при неоднородном режиме ее эксплуатации // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика*. 1966. - № 6. – С. 98-100.
4. Постан М.Я. *Об одном свойстве цепей Маркова с прерываниями переходов и его применение в задачах надежности // Автоматика и телемеханика*. – 1991. - № 9. – С. 182-186.
5. Постан М.Я. *Об инвариантности стационарных эргодических распределений однородных марковских процессов относительно случайных прерываний // Проблемы передачи информации*, 1989. – Т. XXV. – Вып. 1. – С. 46-54.
6. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. *Введение в теорию массового обслуживания: 2-е изд.* – М.: Наука, 1987. – 336 с.

7. *Постан М.Я. Многоканальные обслуживающие системы в случайной среде // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 1999. – Т. 6. – Вып. 1. – С. 88-100.*
8. *Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 2. – М.: Мир, 1984. – 751 с.*
9. *Броди С.М., Погосян И.А. Вложенные стохастические процессы в теории массового обслуживания. – Киев: Наукова думка, 1973. – 128 с.*
10. *Щепочкин С.С. Управляемые линейчатые процессы // Кибернетика. – 1975. - № 6. - С. 79-84.*
11. *Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. – Киев: Наукова думка, 1976. – 184 с.*
12. *Севастьянов Б. А. Эргодическая теорема для марковских процессов и ее приложение к телефонным системам с отказами // Теория вероятностей и ее применение. – 1957.- Т. 2. - № 1. – С. 106-116.*
13. *Ильин В.П., Кузнецов Ю.М. Трехдиагональные матрицы и их приложения. – М.: Наука, 1985.*
14. *Климов Г.П. Стохастические системы обслуживания. – М.: Наука, 1966. – 243 с.*

УДК 656.078.11

К ЦЕНТРАЛИЗОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ ГРУЗОПОТОКАМИ ПОРТОВ

П.А. Макушев

Общие положения и постановка задачи

Практически свободная конкуренция украинских портов между собой приобрела черты "ценовых войн", признаками которых считаются отмеченные на рынке портовых услуг в Украине демпинговые цены, а также рост объемов перевалки при отсутствии роста доходов от нее.

Курс на глобализацию транспорта и регулирование конкуренции, предусмотренный основными направлениями транспортной политики ЕС до 2010 года [1], ограничивает действие рыночных механизмов координации транспорта. В Украине этот курс осуществляется посредством организации государственного объединения портов "Укрпорт". В деятельности этого объединения пытаются реализовать альтернативу рыночным механизмам - координацию процессов на основе системного подхода. Возникла необходимость научного обоснования методов централизованного определения загрузки портов.

В имеющихся системных работах, связанных с определением оптимальной загрузки портов [2-11], учитывается максимальный перечень значимых для проблемы факторов, включающий работу транспорта, объемы грузовых потоков в местах их зарождения и погашения. В результате при формализации задач получаются трудно-разрешимые математические модели. Они имеют большую размерность. Нелинейность и недифференцируемость функций затрат по грузоперевалочному процессу, включая простои судов в ожидании начала работ задают многоэкстремальность задач математического программирования, не решаемых однозначно точными методами.

Для решения подобных задач используются различные способы агрегирования и декомпозиции, применяются методы ветвей и границ в сочетании с эвристическими приемами, собственно эвристические методы, используются процедуры интерактивного процесса.

Данные о загрузке портов получаются и как сопутствующий результат решения задач управления работой транспорта [12-16], флота в отдельности [17-19]. Коль скоро флот не свой, то последние бесполезны.

Проект Европейской комиссии [20] основан на имитационной модели распределения грузопотоков. Попытка воспроизвести работу этой модели не удалась.

В работе [21] с помощью модели на основе теории вероятностей и математического анализа получены оптимальные в смысле минимума

затрат по системе «порт-флот» соотношения между пропускной способностью технологического перевалочного комплекса и объемом грузового потока.

Практической реализацией исследований был действующий инструктивный документ по определению мощности портовых перегрузочных комплексов и порта в целом [22]. Он позволяет по ограниченному числу данных быстро определить оптимальную загрузку мощностей одного порта.

Учитывая изложенное и исходя из посылки, что система – транспортная система страны, включая порты, цели управления грузопотоками – увеличение общей ее прибыли, а исходная информация для принятия решений может быть представлена только крупными показателями, то задача в помощь при принятии решений по загрузке портов может быть сформулирована следующим образом.

Увеличение общей прибыли при правильно построенных тарифах транспорта (учитывающих в соответствии с законом "О транспорте" [23] затраты и признанную норму прибыли) эквивалентно снижению затрат.

Принятие затрат целеполагающим фактором позволяет расширить рамки системы транспорта страны, включив в них и затраты клиентуры, связанные со временем доставки их груза и стоянки в портах транспортных средств. А такой подход уже согласуется с двумя из основных методологических принципов логистики – общих затрат и глобальной оптимизации [24].

Применение же принципов логистики весьма полезно по двум основным причинам:

- в отсутствие конкуренции на рынке услуг по грузоперевалке они являются чуть ли не единственной возможностью учитывать интересы клиентуры, неучет которых чреват потерей последней;

- их использование создает базу для создания собственно логистических систем.

Все предъявляемые к перевозке с перевалкой через порты грузы сводятся в m i -х грузопотоков, $i = 1, 2, \dots, m$, их объем равен Q_i .

Признаками формирования грузопотоков могут быть:

- название груза;

- отправитель (регион отправления) или получатель (регион назначения) в hinterland-е, а, при необходимости, и заморские;

- используемый наземный транспорт;

- расчетный тип судна (если они очень разные) и другое, влияющее на:

- возможность перевалки i -го грузопотока в определенном j -м порту,

- затраты на транспортировку C_{ij}^{mp} и дальнейшую перевалку $C_{ij}^{пер}$

i -го грузопотока в j -м порту на специализированном для данного грузопотока γ_i -м перегрузочном комплексе или универсальном, $C_{ij\gamma}$, \$/т,

• пропускную способность перевалки i -го грузопотока в j -м порту на специализированном для данного грузопотока γ_i -м перегрузочном комплексе или универсальном $\Pi_{ij\gamma}$, т/сут.

$$C_{ij\gamma} = C_{ij}^{mp} + C_{ij\gamma}^{пер} \quad (1)$$

Затраты на транспортировку учитывают собственно затраты на перевозку $C_{ij}^{перев}$, а также время доставки в порт или из порта сушей,

выраженное в затратах денежных средств клиента, вложенных в груз $C_{ij}^{зп}$

$$C_{ij}^{mp} = C_{ij}^{перев} + C_{ij}^{зп}; \quad (2)$$

$$C_{ij}^{зп} = C_{зп.i} \cdot t_{досм.ij} \cdot \frac{E}{365 \cdot 100}, \quad (3)$$

где $C_{зп.i}$ - стоимость тонны i -го груза, \$/т;

$t_{досм.ij}$ - время доставки i -го груза в j -й порт¹, сут..

Из [25] следует, что для железнодорожных перевозок

$$t_{досм.ij} = \left[\frac{L}{v} \right] + 2, \quad t_{досм.ij} = \left[\frac{L}{v} \right] + 3 \quad (4)$$

для обычных смешанных перевозок и для перевозок с участием паромной переправы, соответственно, где L - тарифное расстояние, км; v - грузовая скорость, обычно 200 км/сутки;

E - годовой банковский процент по депозитным вкладам.

Учет затрат транспортных средств (судов) клиентуры под обработкой при правильных фиксированных тарифах на грузоперевалку можно не производить, потому что в этом случае либо разная интенсивность обработки судов в разных портах отражена в различии тарифов по данным портам, либо эта интенсивность одинакова.

¹ Время нахождения груза в порту не учитывается, поскольку в трамповых перевозках время накопления в порту судовой партии груза зависит не от порта, а от судна, которое уже определяет возможный порт перевалки груза; время нахождения груза в порту по коммерческим соображениям (при коммерческом, а не технологическом хранении) также неизменно по портам связи со своей природой. При линейном судоходстве и значительной разнице по портам интервалов I захода судов время ожидания грузом судна $I/2$ (сут.) можно добавлять к времени доставки.

Если, тем не менее, вышеназванные обстоятельства не имеют места, а учет затрат флота на стоянке важен из-за сложившихся условий фрахтового рынка (длительная стоянка влияет на фрахтовые ставки клиентуры при экспорте на условиях CIF и импорте по FOB, или на цену товара при экспорте по FOB и импорте по CIF), в показатель $c_{ij\gamma}^{пер}$ можно включить составляющую затрат по содержанию судна на стоянке $c_{ij\gamma}^{суд}$, определенную по формуле

$$c_{ij\gamma}^{суд} = \frac{c_i^{суд}}{M_{ij\gamma}}, \quad (5)$$

где $c_i^{суд}$ - стоимость содержания судна, перевозящего грузы i -го грузопотока, на стоянке, \$/судо-сутки;

$M_{ij\gamma}$ - валовая интенсивность обработки указанного судна в j -м порту на γ_i -м перегрузочном комплексе, т/судо-сутки.

Учет затрат судов во время ожидания ими начала обработки во избежание нарушения линейной конструкции математической модели решения задачи при прямом счете времени ожидания имеющимися методами теории массового обслуживания выполним путем ориентации решения на оптимальную количественную загрузку причалов, оцениваемую оптимальным коэффициентом их занятости во времени K_{opt} . Последний можно принять по рекомендациям UNCTAD [20] со следующими значениями в общем виде.

Таблица 1. Значения коэффициента занятости причалов

Количество причальных мест	Коэффициент занятости
1	30%
2	50%
3	65%

По каждому j -му порту известно количество универсальных и специализированных перегрузочных комплексов $n_{j\gamma}$. Число категорий таких комплексов равно s .

При этом понятием "перегрузочный комплекс" согласно "Положению по учету и использованию производственных мощностей в портах" [22] охватывается совокупность технических средств (сооружений, зданий, оборудования, обустройств, транспортных и

инженерных коммуникаций) или часть этой совокупности, обеспечивающая прием (разгрузку), технологическое хранение, отправление (загрузку), т.е. все операции перевалки грузов с железнодорожного, автомобильного, речного, трубопроводного транспорта на морской (и обратно), ограниченная условиями приема и выполнения погрузочно-разгрузочных операций одновременно только на одном морском транспортном судне.

Моделирование

Определяются средние коэффициенты занятости комплексов по их категориям γ

$$\bar{K}_{\gamma}^{зан} = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i}{n_{\gamma}}, \quad \gamma = 1, 2, \dots, c. \quad (6)$$

Если обозначить искомое количество i -го грузопотока для j -го порта (с перевалкой на универсальном или специализированном γ_i -м перегрузочном комплексе) через $X_{ij\gamma}$, то математическая модель задачи может иметь вид:

целевая функция отражает минимизацию затрат

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{\gamma=1}^c c_{ij\gamma} \cdot X_{ij\gamma} \rightarrow \min; \quad (7)$$

ограничения учитывают:

1) перевозку и перевалку заданных объемов грузов

$$\sum_{j=1}^n \sum_{\gamma=1}^c X_{ij\gamma} = Q_i \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (8)$$

2) ограничения по пропускной способности портов и их перегрузочных комплексов

$$\sum_{i \in \gamma_i} \frac{X_{ij\gamma}}{\Pi_{ij\gamma}} \leq K_{j\gamma} \cdot n_{i\gamma} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad \gamma = 1, 2, \dots, c; \quad (9)$$

а также неотрицательность переменных

$$X_{ij\gamma} \geq 0, \quad i=1,2,\dots,m, \quad j=1,2,\dots,n; \quad \gamma=1,2,\dots,c_i, \quad (10)$$

где $K_{j\gamma}$ - коэффициент занятости причалов комплексов γ категории в j -м порту

$$K_{j\gamma} = \begin{cases} \bar{K}_{\gamma}^{зан}, & \text{если } \bar{K}_{\gamma}^{зан} > K_{opt}, \\ K_{opt}, & \text{если } \bar{K}_{\gamma}^{зан} < K_{opt}. \end{cases} \quad (11)$$

При проведении политики гарантированной загрузки малых портов j^M не ниже определенного уровня, измеряемого коэффициентом занятости как K_{min} , выражение (11) будет иметь вид

$$K_{j\gamma} = \begin{cases} \bar{K}_{\gamma}^{зан}, & \text{если } \bar{K}_{\gamma}^{зан} > K_{opt}, \\ K_{opt}, & \text{если } \bar{K}_{\gamma}^{зан} < K_{opt}, \quad j \notin j^M, \\ K_{min} < \bar{K}_{\gamma}^{зан}, & \text{если } \bar{K}_{\gamma}^{зан} < K_{opt}, \quad j \notin j^M. \end{cases} \quad (12)$$

а ограничение (9) запишется в двух видах: со знаком « \Leftarrow » для малых портов $j \in j^M$ и со знаком \leq для остальных портов $j \notin j^M$.

Пример

Для демонстрации работы модели в данной статье приведен условный и простейший пример. Пусть имеем ситуацию с четырьмя грузопотоками и четырьмя портами (табл.2). Уголь в Одессе не перегружают вовсе, в других портах он переваливается через специализированные комплексы, в Мариуполе допускается перегрузка угля и на универсальных причалах.

Для решения линейной модели (7)–(10) использован Microsoft Excel. Результаты решения для данных условий приведены в табл. 3.

Управление морскими портами

Таблица 2. Характеристика транспортной ситуации

Вид груза	Подвид груза	Количество, т/сут.	Номер груза i	Показатели	Значения показателей по j -м портам γ -м типам причалов перевалки							
					Рени $j=1$		Одесса $j=2$		Южный $j=3$		Мариуполь $j=4$	
					унив. пр. $\gamma=1$	спец. пр. $\gamma=2$	унив. пр. $\gamma=1$	унив. пр. $\gamma=1$	спец. пр. $\gamma=2$	унив. пр. $\gamma=1$	спец. пр. $\gamma=2$	
Металл	Россия	10000	1	$C_{ij\gamma}$	15		12	12		11		
				$P_{ij\gamma}$	1900		2500	4000		1800		
	Украина	5000	2	$C_{ij\gamma}$	13		11	11		8		
				$P_{ij\gamma}$	1900		2500	4000		1800		
Уголь	Россия	15000	3	$C_{ij\gamma}$		11			8	12	10	
				$P_{ij\gamma}$		4000			8000	3000	5000	
	Украина	15000	4	$C_{ij\gamma}$		10			7	8	6	
				$P_{ij\gamma}$		4000			8000	3000	5000	
Количество причалов					5	2	9	1	1	5	2*	

Таблица 3. Распределение грузопотоков

Вид груза	Количество, т/сут		Загрузка по j-м портам γ-м типам причалов перевалки						
			Рени j=1		Одесса j=2	Южный j=3		Мариуполь j=4	
	принятого	не принятого	Рени унив.	Рени спец.	Одесса унив.	Южный унив.	Южный спец.	Мариуполь унив.	Мариуполь спец.
Металл Россия	10000	0	0		5000	4000		1000	
Металл Украина	5000	0	0		0	0		5000	
Уголь Россия	15000	0		7000			8000	0	0
Уголь Украина	15000	0		0			0	5000	10000
Количество использованных причалов			0	1,75	2	1	1	5	2
Количество неиспользованных причалов			5,00	0,25	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00

ЛИТЕРАТУРА

1. *White Paper European transport policy for 2010: time to decide, European Communities, 2001.*
2. Дуберштейн А.М., Суздаевич Л.Г., Эйсснер Ю.Н. Экономико-математическая модель оптимальной специализации морских портов // *Тр. «Союзморниипроекта», 1970. - Вып. 28(34). - С. 67-74.*
3. Носов В.А. Экономико-математическая модель оптимизации развития портов бассейна // *Тр. «Союзморниипроекта», 1972. - Вып. 32(38). - С. 103-109.*
4. Андреев Ю.Н. Вопросы планирования развития морских портов// *Тр. ИКТП, 1973. - Вып. 4. - С. 5-73.*
5. Громовой Э.П., Дудина Н.А., Махуренко Г.С. Моделирование процессов перспективного развития морского транспорта//*Тр. ОИИМФ, 1978. - Вып. 14. - С. 19-21.*

6. Халитов Р.Б., Латыпов Р.А. О задаче распределения грузопотоков по портам перевалки в смешанном сообщении: Совершенствование планирования и управления на морском транспорте// Сб. научн. тр. «Союзморниипроект». - М., 1982. - С. 60-67
7. Магамадов А.Р. Координация работы различных видов транспорта: Учебное пособие для вузов морского транспорта. - М.: Транспорт, 1982. - 176 с.
8. Магамадов А.Р. Координация работы портов: Учебное пособие. М.: В/О "Мортехинформреклама", 1983. - С - 24.
9. Степанец А.В., Чиж А.Г. Обобщенный алгоритм обоснования оптимальной специализации портов морского бассейна. - В кн.: Экономика и управление морским транспортом. М.: В/О "Мортехинформреклама", 1984. - С. 100-102.
10. Бородавский М.Ю., Суколенов А.Е. Экономико-математическое моделирование специализации и развития морских портов при перспективном планировании. В кн.: Экономические и эксплуатационные проблемы производственно-хозяйственной деятельности морского транспорта: Сб. науч. тр. М.: Транспорт, 1984. - С. 33-44.
11. Гирина О.Б. Методы определения и анализа использования пропускной способности портов бассейна: Автореф. дисс.... канд. экон. наук: Одесский институт инженеров морского флота. - Одесса, 1993. - 20 с.
12. Резер С.М., Шкультин И.В., Ловецкий С.Е., Бюзюк М.А. АСУ взаимодействием видов транспорта / Под ред. С.М. Резера. - М.: Транспорт, 1979. - 208 с.
13. Резер С.М. Комплексное управление перевозочным процессом в транспортных узлах. - М.: Транспорт, 1982. - 160 с.
14. Резер С.М. Взаимодействие транспортных систем. - М.: Наука, 1988. - 244 с.
15. Резер С.М. Управление транспортным комплексом. - М.: Наука, 1989. - 328 с.
16. Громов Н.Н., Персианов В.А. Управление на транспорте: Учебник для вузов. - М.: Транспорт, 1990. - 336 с.
17. Воевудский Е.Н. Управление системой обслуживания судов в портах. - М.: Транспорт, 1983. - 298 с.
18. Экономико-математическое моделирование деятельности флота и портов / В.С. Михалевич, А.А. Бакаев, В.С. Петухов и др. - М.: Транспорт, 1986. - 287 с.
19. Воевудский Е.Н., Постан М.Я. Стохастические модели в проектировании и управлении деятельностью портов. - М.: Транспорт, 1987. - 318 с.

20. Улучшение взаимосвязи портового/внутритерриториального транспорта в портах Черного моря (проект N UK 92.01.03.01.B0008), Раздел А: Взаимодействие морского и сухопутного транспорта, А2 - Имитационная модель распределения грузопотоков. Европейская комиссия, 1995. -177 с.
21. Горбатый М.М. Теория и практика оптимизации производственных мощностей морских портов. М.: Транспорт, 1981. - 168 с.
22. Временные указания по расчету установленной мощности портовых перегрузочных комплексов. Приложение № 2 к письму ММФ СССР от 04.01.77 г.
23. Закон Украины "О транспорте" // Ведомости Верховной Рады Украины, 1994, № 51.
24. Основы логистики: Учебное пособие // Под ред. Л.Б. Миротина и В.И. Сергеева. - М.: ИНФРА-М, 1999. - 197 с.
25. Правила вычисления сроков доставки груза: Приказ Министерства транспорта Украины от 21.11.00 г. № 644.

УДК 656.078.547.912

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА БИЗНЕС-ПЛАНА РАЗВИТИЯ МОРСКОГО ПОРТА

В.З. Ананьина

В специальной литературе рассматриваются разные аспекты проблемы развития портов в сложных современных условиях их функционирования. В намеченном направлении обоснованы принципы весовой характеристики частных и результативных показателей логистической цепочки интермодального сообщения. Развитием этой теории явилось пофакторное отражение структурных элементов оценочных показателей касаясь состава и взаимодействия их параметров в процессе интермодальной перевозки. Кроме того, модифицирован метод определения прибыли порта оценкой негативного влияния упущенной выгоды ввиду неучастия конкурирующих портов в интермодальном сообщении [1]. Но не разработана методология обеспечения развития портов, учитывая специфику их деятельности и роли в обеспечении интермодальных перевозок.

Поэтому назначением данной статьи является разработка соответствующей методологии развития порта в форме бизнес-плана, отражающей функциональные структуры, информационное обеспечение и методы оптимизации решения задач эффективного развития порта.

Методические подходы к обоснованию производственного потенциала порта. Участие национальных портов в освоении грузопотоков, определяемых мировыми и региональными хозяйственными связями, должно учитывать высокую предпринимательскую эффективность функционирования портов и большое влияние на экономику страны. Вместе с тем высокая экономическая эффективность оперирования торговых портов на рынке транспортных услуг обуславливает жесткую конкуренцию за освоение и привлечение новых грузопотоков. Поэтому необходимо поддержание отечественных портов на конкурентоспособном уровне, обеспечивающем достижение и сохранение нормальной предпринимательской и потребительской эффективности.

Управление процессами адаптации портов к внешним изменениям рынка транспортных услуг требует теоретического и методического обоснования принятия оптимальных экономических решений. При этом необходимо уточнение содержания показателей с учётом дополнения состава параметров и их взаимодействия в пределах экономического жизненного цикла порта. Также необходима сбалансированность источников финансирования и потребности капитальных вложений для поддержания мощности порта в соответствии с параметрами эффективного оперирования на рынке портовых услуг.

Роль порта и его место в составе фрахтового рынка определяют следующие параметры:

- масса и структура грузооборота по роду груза, грузопотокам;
- мощность его перегрузочных комплексов;
- организационно-технологический уровень грузоперевалки;
- мощность служебно-вспомогательного флота;
- разнообразие и качество услуг;
- уровень логистических технологий в интермодальных сообщениях.

Степень соответствия порта этим факторам определяет результативность развития, уровень производительности ресурсов, макроэкономическую и внесистемную эффективность.

Внутрисистемная (предпринимательская) результативность развития по критериям адаптации порта к изменениям, учитывается показателями эффективности использования ресурсов, включая норму прибыли, предельные затраты, качество перегрузочного процесса, интенсивность обработки транспортных средств, степень загрузки портовых перегрузочных комплексов (ППК).

Оценка состояния порта и необходимости адаптационного развития сводится к сопоставлению фактических предельных затрат с регламентированными издержками для освоения новых и сохранения традиционных грузопотоков. Макроэкономическая и внесистемная (потребительская) потребность и значимость обработки транспортных единиц и грузовых потоков отражается в тарифах и норме прибыли.

Оптимизация развития предприятий транспорта направлена на максимизацию как потребительского, так и предпринимательского эффекта. При этом потребительский эффект отражает место порта в логической цепочке транспортного конвейера, предпринимательский – степень финансового благополучия порта, устойчивость адекватности порта уровню рынка. Реализация задач адаптации является управлением процессом обеспечения максимальной разности между экономическими результатами и затратами на работу предприятия и использование его ресурсов.

Механизм управления эффективностью функционирования порта должен обеспечить рациональную занятость ресурсов с учётом степени их соответствия и внешних ограничений.

Улучшение хозяйственной практики отражается на уровне самоокупаемости и самофинансирования, поэтому необходима достаточность производственно-финансовых резервов для обеспечения стабильности функционирования порта в условиях изменяющихся параметров рынка.

Ситуационные позиции. Для морских портов Украины на современном этапе их развития характерно участие в интермодальных

сообщениях в качестве пункта грузоперевалки, транспортного узла и стратегического центра формирования грузопотоков.

Самостоятельность портов в обеспечении их загрузки существенно повысила роль коммерческой деятельности порта и активировала поиск путей наращивания его производственной мощности, улучшения показателей обработки и обслуживания грузовых и транспортных потоков на рынке услуг.

По состоянию экономики Украины государственное участие в развитии портов ориентированно на возможное улучшение правового обеспечения производства без финансовой поддержки. Поэтому развитие порта осуществляется на основе самофинансирования и разных форм внешнего инвестирования.

Различие грузопотоков по грузам, перевозочным средствам, интенсивности грузовых и транспортных потоков, а также неравноценность портов по географическому положению, техническому уровню обуславливают разную привлекательность использования портов для клиентуры. Кроме того, наличие одинаковых грузов в грузообороте разных портов при неполном использовании их мощности устанавливает конкуренцию портов и требует их адаптационного развития.

По существу позиций бизнес-плана можно сказать следующее:

↳ параметрическая характеристика внешних факторов касается природно-навигационных условий порта, грузопотоков, транспортной характеристики грузов, способа предъявления к перевозке и режима прохождения через порт, характеристики транспортных потоков судов и перевозочных средств смежников;

↳ анализ передовой технологии перегрузки грузов проводится сопоставлением данного и передовых отечественных и зарубежных портов по способам и средствам выполнения грузоперевалки с сравнительной оценкой производственно-экономических показателей. По результатам анализа определяется характер адаптационного развития порта для выхода на конкурентоспособные параметры.

Формирование альтернативных элементов развития порта может рассматриваться в направлениях строительства нового и (или) реконструкции эксплуатируемого ППК.

Структурные элементы бизнес-плана. Назначением бизнес-плана является обоснование приоритетного направления развития порта для привлечения и освоения тяготеющих грузопотоков.

В отправных позициях бизнес-план базируется на результатах проведенного анализа рыночных возможностей порта с учетом экономических законов рынка.

Характерны два аспекта решения проблемы:

➤ строительство нового портового перегрузочного комплекса (ППК), ориентированного на технический уровень наиболее развитых портов на рынке услуг по освоению подобных грузопотоков;

➤ реконструкция уже имеющегося ППК дооборудованием несоответствующих производственных элементов для выхода на заданные мощность и показатели производственного процесса, отвечающие уровню рынка.

Строительство нового ППК обычно рассматривается при большом грузообороте и (или) значительном несоответствии показателей порта параметрам рынка; реконструкция – при малом грузообороте, учитывая возможность окупить капиталозатраты.

Функциональная структура и последовательность структурных элементов проектирования отображены в блок-схеме на рисунке. Методическая и информационная ориентация разработки структурных элементов приведены ниже.

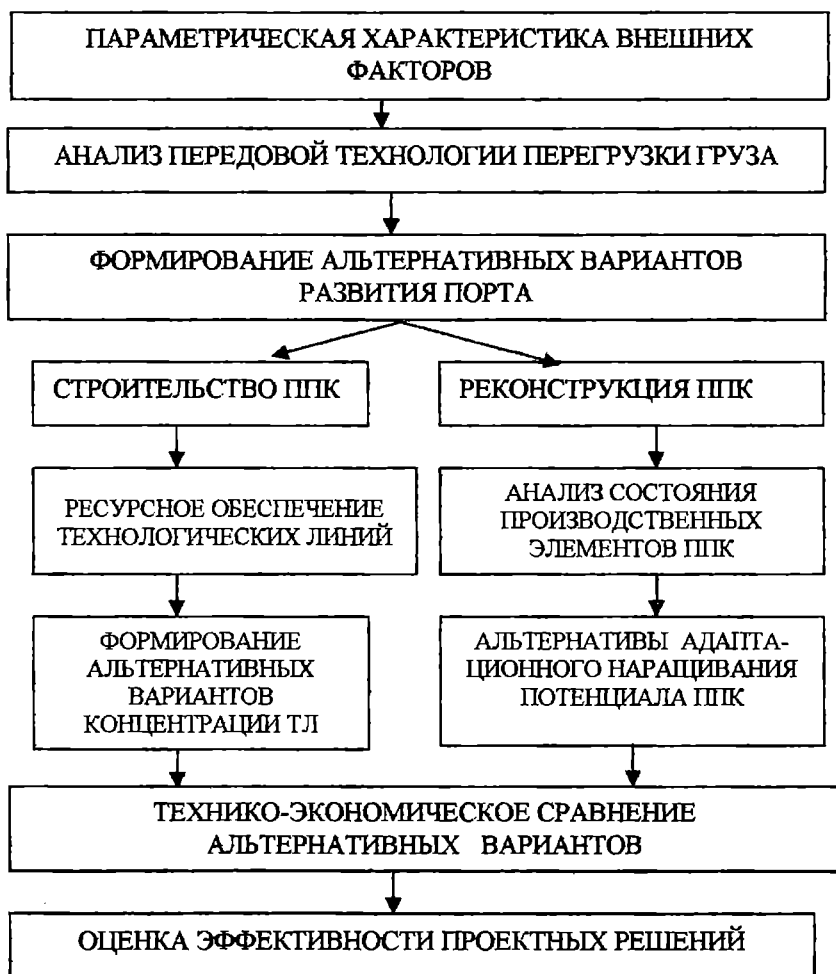


Рис. Блок-схема проектирования развития порта для освоения тяготеющего грузопотока

Технико-экономическое сравнение альтернативных вариантов и оценка их эффективности. По каждому варианту определяется система производственно-экономических показателей.

Производственные показатели включают: среднесуточную интенсивность обработки судна в разрезе года I , пропускную способность причала суточную (оперативную) $\Pi_{сут}$ и годовую (технологическую) $\Pi_{Г}$, потребное число причалов $N_{пр}$

$$I = \beta N_{ТЛ} \bar{P}_{ТЛ} K_{МЕТ} \cdot K_{МАН}; \quad (1)$$

$$\Pi_{сут} = \frac{Q_C}{\left(\frac{Q_C}{I} + t_{BC} \right)}; \quad (2)$$

$$\Pi_{Г} = \frac{\Pi_{сут} T_H}{K_{МН}}; \quad (3)$$

$$N_{пр} = \frac{Q_{Г}}{\Pi_{Г}}; \quad (4)$$

где $\beta, K_{МЕТ}, K_{МАН}$ - коэффициенты снижения производительности из-за концентрации технологических линий (ТЛ), простоя по метеопричинам, из-за маневровых операций, соответственно;

$N_{ТЛ}$ - число ТЛ на причале, ед.;

$\bar{P}_{ТЛ}$ - средневзвешенная производительность ТЛ, т/сут.;

$Q_{Г}$ - годовой грузооборот, т;

$K_{МН}$ - коэффициент месячной неравномерности грузопотока;

T_H - навигационный период, сут.

Экономическими показателями являются:

\mathcal{E} - экономический эффект;

\mathcal{E}_{ϕ} - эффективность;

F_6 - прибыль балансовая;

$F_{\mathcal{E}}$ - прибыль экономическая;

$n_{ок}$ - срок окупаемости дополнительных капиталовложений n_k .

$$\mathcal{E} = S_6 - S_{пр}, \text{ грн/г}, \quad (5)$$

$$\mathcal{E}_{\phi} = \mathcal{E}/Q_{Г}, \text{ грн/т}, \quad (6)$$

$$F_{\text{б}} = D - S_{\text{II}}, \quad (7)$$

$$F_{\text{э}} = D - S_{\text{II}} - U, \quad (8)$$

$$n_{\text{ок}} = \Delta K / \text{э}, \quad (9)$$

где $S_{\text{б}}, S_{\text{пр}}$ - эксплуатационные расходы на освоение грузопотока в базовом (традиционном) и проектном вариантах;

$Q_{\text{Г}}$ - годовой грузооборот, т;

D - суммарная выручка;

U - упущенная выгода из-за неиспользования конкурирующего порта для освоения грузопотока;

ΔK - дополнительные капиталовложения, грн.

Выбор варианта проводится по значению экономической прибыли: положительное подтверждает приемлемость варианта; максимальное – приоритет; ограничивающим условием является соблюдение срока окупаемости дополнительных капиталовложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимова В.Р. *Микроэкономика*. – М., 1996. – С. 327.
2. Степанов О.Н. *Экономическая стратегия эффективного развития морских торговых портов*. Одесса: Консалтинг, 1998. – 181 с.

УДК: 656.615:658.003

О СООТНОШЕНИИ ЗАГРУЗКИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МОРСКОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА СОВОКУПНОСТИ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМЫХ ПРИЧАЛОВ

А.А. Малаксиано, Н.А. Малаксиано

В задачах, связанных с обоснованием оптимальной структуры парка подъемно-транспортного оборудования порта, возникает необходимость нахождения оптимальной загрузки (грузопереработки) порта и его отдельных производственных перегрузочных комплексов (грузовых районов) [1]. Производственный перегрузочный комплекс (ППК) состоит из совокупности взаимозаменяемых причалов, оснащенных, как правило, однотипным оборудованием, поэтому прибывшее судно может обрабатываться на любом из свободных причалов.

Пропускная способность морского грузового фронта (МГФ) комплекса является одним из важнейших элементов, определяющих производственную мощность ППК в целом. Под пропускной способностью МГФ понимают максимальное количество груза, которое может быть им переработано за данный отрезок времени (как правило, год) при наиболее полном использовании оборудования и календарного времени производства. В соответствии с [2] суточная пропускная способность МГФ совокупности из m причалов определяется как

$$P = \sum_{i=1}^m P_i, \quad P_i = \frac{Q_{ci} t_{эф}}{Q_{ci} / N_i P_{ТЛi} + \tau_{еснi}}, \quad (1)$$

где P_i - суточная пропускная способность МГФ i -го причала;

Q_{ci} - загрузка судна;

$t_{эф}$ - продолжительность работы причала в течение суток;

N_i - количество технологических линий на МГФ причала;

$P_{ТЛi}$ - производительность одной технологической линии;

$\tau_{еснi}$ - продолжительность вспомогательных операций, выполняемых с судном у причала, включая ожидание начала грузовых работ.

Загрузка МГФ Q на данном отрезке времени не должна превышать его пропускную способность, в противном случае ППК не освоит такой грузопоток. Загрузка, равная пропускной способности, уже доступна для комплекса и, если при этом суда будут прибывать строго по расписанию с

интервалом, равным времени их обслуживания, то в этом случае очереди на рейде не будет. Однако, из-за неравномерного характера прибытия и обработки судов такая организация совместной работы порта и перевозчиков, как известно, практически невозможна, так как по мере приближения загрузки к пропускной способности в порту начинают скапливаться большие очереди судов, ожидающих обработки, что сопряжено с недопустимо большими финансовыми потерями клиентов порта. Загрузку МГФ на практике никогда не доводят до предельного значения. В соответствии с действующими Нормами [2] рациональную загрузку ППК (соответственно и МГФ) рекомендуется находить как

$$Q = k_3 П,$$

где k_3 - коэффициент занятости причала обработкой судов или коэффициент, характеризующий степень загрузки причала.

В настоящее время не разработана методика обоснования этого коэффициента. Большинство авторов предлагают определять его эмпирическим путем, но это, как правило, невозможно ввиду отсутствия статистических данных, необходимых для установления количественной зависимости показателей обслуживания судов от загрузки ППК в различных производственных ситуациях. При обосновании рациональной загрузки коэффициент занятости рекомендуется принимать [2]: 0,6–0,7 (для универсальных комплексов), 0,5–0,6 (для комплексов, специализирующихся на навалочных и лесных грузах), 0,4–0,5 (для контейнерных и ролкерных терминалов), 0,45–0,50 (для нефтеналивных комплексов). Таким образом, для всех комплексов одной специализации устанавливается примерно одинаковый уровень загрузки, при этом не учитывается очевидное влияние на эту величину таких важных факторов как параметры судопотока и ППК, технология выполнения погрузочно-разгрузочных работ и организация эксплуатации и ремонта подъемно-транспортного оборудования.

Загрузка ППК, рассчитанная на основе таких необоснованных значений коэффициента занятости, также будет весьма далека от рационального, а тем более, оптимального уровня. Завышение загрузки приводит к значительному увеличению продолжительности стоянки судов в порту, занижение – к недоиспользованию производственной мощности ППК. Но обе ситуации недопустимы, так как ведут к большим экономическим потерям участников транспортного процесса.

Целью данной работы является исследование влияния степени загрузки совокупности взаимозаменяемых причалов, входящих в ППК, на результаты обслуживания судов на них.

Рассмотрим ППК, состоящий из m -причалов. Ввиду неравномерного прибытия судов количество занятых причалов на таком

комплексе является случайной величиной. Обозначим P_γ вероятность того, что на комплексе будет занято γ причалов (вероятность γ -го состояния системы). Так как число одновременно работающих причалов образует полную группу несовместимых событий, то γ в данный момент времени может принимать только одно из значений $0, 1, \dots, m$, а

$$\sum_{\gamma=0}^m P_\gamma = 1. \text{ Будем исходить из предположения, что причалы занимаются}$$

судами в порядке убывания времени их обслуживания. Это соответствует принятому на практике правилу, когда прибывшее судно отправляется на свободный причал с наибольшей интенсивностью грузовых работ. Будем также полагать, что ресурсы распределяются равномерно между судами, находящимися на прямолинейном участке МГФ и на одном причале может находиться только одно судно. Очевидно, что возможны и другие варианты дисциплины очереди, например, при распределении ресурсов между судами может быть использован так называемый принцип «узкого фронта», могут быть заданы приоритеты обработки судов и т.п. Дисциплина очереди в данной работе принимается заданной и рассматривается как неуправляемый параметр.

Возможность перемещения стационарных машин между причалами зависит, прежде всего, от конфигурации причальной линии МГФ. Рассмотрим простейший случай, когда МГФ имеет ломаную линию причального фронта, не позволяющую перемещать перегрузочные установки с причала на причал, а продолжительность обслуживания судов на отдельных причалах различна. Пронумеруем отдельные причалы в порядке убывания времени обслуживания судов на них и обозначим t_j продолжительность обработки судна на причале с j порядковым номером,

$$t_j = \frac{Q_{cj} 24}{N_j P_{TЛj} t_{эф}} + \tau_{вснj}, \quad j = \overline{1, m}.$$

Тогда интенсивность обслуживания судов в γ -м состоянии системы составит

$$\mu_\gamma = \sum_{j=1}^{\gamma} \frac{1}{t_j}, \quad \gamma = \overline{1, m}.$$

Если продолжительность обслуживания судов на всех причалах одинакова $t_i = t_1 = const$, то $\mu_\gamma = \gamma \frac{1}{t_1}$.

Если МГФ имеет прямую линию причального фронта, допускающую смещение установок с одного причала на другой, то в периоды отсутствия работ на каком-то из причалов машины по подкрановым рельсовым путям перемещают на работающие причалы для ускорения обработки судов. Таким образом, в моменты неполной занятости МГФ общее снижение интенсивности грузовых работ из-за уменьшения количества одновременно обрабатываемых судов частично, а иногда даже полностью, компенсируется ускорением обработки уже прибывших судов. В этом случае продолжительность обслуживания судов на всех работающих причалах одинакова и определяется средним числом установок, выделяемых на судно.

Интенсивность обслуживания судов в γ -м состоянии системы составит

$$\mu_\gamma = \begin{cases} \gamma \frac{1}{t(K)}, & \text{если } \gamma K \leq N; \\ \gamma \frac{1}{t(N/\gamma)}, & \text{если } \gamma K > N, \end{cases} \quad (2)$$

где K - верхняя граница концентрации причальных установок на судне [3];

N - количество установок на МГФ;

$t(K)$, $t(N/\gamma)$ - продолжительность обслуживания судна на ППК при концентрации на нем соответственно K и N/γ установок.

Рассмотрим алгоритм расчета μ_γ в случае, когда МГФ комплекса состоит из нескольких участков, а перемещение причальных установок допускается только в пределах каждого из них. Пользуясь выражением (2), определим интенсивность обслуживания одного судна на отдельных участках ППК с учетом возможности перемещения установок вдоль причальной линии каждого участка. Наибольшая из этих величин μ_1 характеризует интенсивность обслуживания одного судна. Рассмотрим возможные варианты расстановки двух судов по участкам ППК. Для каждого варианта определим интенсивность обслуживания в системе. Наибольшая из этих величин μ_2 характеризует интенсивность обслуживания двух судов. Аналогичным образом определим наибольшую интенсивность обслуживания трех судов μ_3 и так далее, пока не будут

рассмотрены все m судов, интенсивность обслуживания которых

$$\text{составит } \mu_m = \sum_{i=1}^m \frac{1}{t_i}.$$

Теперь рассмотрим наиболее общий случай, когда допускается перемещение причальных установок как в пределах данного комплекса, так и со смежных ППК. Такая передача машин во временное пользование довольно часто практикуется между смежными ППК, соединенными общими подкрановыми путями, и осуществляется на условиях внутрипроизводственного хозяйственного расчета.

Обозначим $\mu_{\gamma rl}$ наибольшую интенсивность обслуживания для случая, когда на данном ППК одновременно обрабатывается γ судов, а на двух смежных комплексах, расположенных слева и справа от него, обрабатывается соответственно l и r судов. Величина $\mu_{\gamma rl}$ рассчитывается так же, как и в случае, когда МГФ комплекса состоит из нескольких участков, но при этом в состав оборудования данного ППК следует ввести установки, которые можно на него переместить со смежных комплексов. При этом справедливо полагать, что «соседи» передают только избыточные машины, которые при сложившейся ситуации не могут быть использованы для ускорения погрузочно-разгрузочных работ на собственных комплексах.

Например, при прямолинейном причальном фронте общее количество установок на данном ППК в такой ситуации следует принимать

$$N_{\gamma} = N + \frac{(N_l - lk) + (N_r - rk) + |N_l - lk| + |N_r - rk|}{2},$$

где N - количество собственных причальных установок данного ППК;
 N_l, N_r - количество причальных установок на смежных ППК, расположенных соответственно слева и справа от данного комплекса.

Интенсивность обслуживания γ судов в этом случае рассчитывается как математическое ожидание дискретной случайной величины

$$\mu_{\gamma} = \sum_{l=0}^{m_l} \sum_{r=0}^{m_r} \mu_{\gamma rl} P_l P_r.$$

Очевидно, что по мере увеличения загрузки будут увеличиваться вероятности состояний, в которых заняты все или почти все причалы. По мере же уменьшения загрузки – вероятности состояний, когда свободны все или почти все причалы. В связи с этим будут изменяться и показатели, характеризующие эффективность обслуживания судов в порту. Причем от степени загрузки зависят не только показатели, характеризующие пребывание судов в очереди, но и показатели обслуживания уже принятых под обработку судов. Если первая зависимость очевидна, то вторая объясняется наличием «взаимопомощи», которая состоит в том, что свободные от работы машины перемещаются на смежный причал для ускорения обработки находящегося на нем судна. Очевидно, что чем больше загрузка ППК, тем меньше возможностей для оказания «взаимопомощи» и наоборот.

Загрузку ППК на данном отрезке времени T принято выражать в натуральных единицах. Однако такой способ измерения не учитывает размер судовой партии груза. Более полной характеристикой загрузки ППК является относительный показатель – интенсивность прибытия судов $\lambda = Q/Q_c T$.

Таким образом, целью данной работы является исследование зависимости показателей эффективности обслуживания судов (среднего времени ожидания в очереди, средней продолжительности обработки и др.) от интенсивности их прибытия при данных фиксированных параметрах ППК, принятой организации и технологии выполнения погрузочно-разгрузочных работ, эксплуатации и ремонта подъемно-транспортного оборудования.

При рассматриваемой системе взаимопомощи простейшая схема гибели и размножения к данной модели не применима. Поэтому для решения поставленной задачи мы будем исходить из общей модели марковской цепи. Будем считать, что время между прибытием судов и время обработки судов является случайными величинами с пуассоновским распределением. Рассмотрим ППК из 3-х причалов с рейдом n судов. Состояния данной системы в момент времени t можно описать набором из четырех чисел (i, j, k, r) , где i, j и k принимают значение 1, если соответственно первый, второй и третий причалы заняты, и 0, если соответствующие причалы свободны. Значение последней переменной $r = 0, \dots, n$ показывает количество судов на рейде.

Для удобства, обозначим состояния системы:

$$C_1 = (0,0,0,0), \quad C_2 = (1,0,0,0), \quad C_3 = (0,1,0,0),$$

$$C_4 = (0,0,1,0), \quad C_5 = (1,1,0,0), \quad C_6 = (1,0,1,0),$$

$$C_7 = (0,1,1,0), \quad C_8 = (1,1,1,0), \quad C_9 = (1,1,1,0),$$

$$C_{10} = (1,1,1,1), \quad C_{11} = (1,1,1,2), \quad \dots, \quad C_{8+n} = (1,1,1,n).$$

При заданной схеме организации взаимопомощи, интенсивность обработки судна на i -м причале в момент времени t зависит от того, в каком состоянии находятся остальные причалы. Обозначим $\mu_{i\gamma}$ – среднюю интенсивность обработки судов на i -м причале, когда ППК находится в γ -м состоянии, а λ – среднюю интенсивность поступления судов на ППК. При этом $\mu_{i8} = \mu_{i\gamma}$ для всех $i = \overline{1,3}$, $\gamma = \overline{9,n}$. Обозначим $\mu = \mu_{18} + \mu_{28} + \mu_{38}$. События, состоящие в том, что в произвольный фиксированный момент времени t система находится в состоянии C_i , $i = 1, \dots, 8+n$, образуют полную группу событий. Обозначим $p_i(t)$ – вероятность того, что в момент времени t система находится в состоянии C_i . Зная вероятности каждого из состояний C_i , когда система уже функционирует длительное время, мы без труда сможем найти все показатели обслуживания судов на ППК. Для этого используя стандартный “ Δt -метод” (см., например, [4. С.28]), составим дифференциальные уравнения, а затем перейдем к уравнениям для стационарных вероятностей.

Зафиксируем некоторый момент времени t и малый промежуток времени Δt . Выразим вероятность того, что в момент времени $t + \Delta t$ ППК будет находиться в состоянии C_1 . Имеем

$$\begin{aligned}
 p_1(t + \Delta t) = & p_1(t) \cdot (1 - \lambda \cdot \Delta t) + p_2(t) \cdot \mu_{12} \cdot \Delta t + \\
 & + p_3(t) \cdot \mu_{23} \cdot \Delta t + p_4(t) \cdot \mu_{34} \cdot \Delta t + o(\Delta t).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (3) выражает вероятность того, что в момент времени t на ППК не было судов и за промежуток времени Δt ни одно судно не прибыло. Сумма остальных слагаемых выражает вероятность того, что в момент времени t на ППК будет всего одно судно и за промежуток времени Δt его обработка закончится. После элементарных преобразований и предельного перехода при $\Delta t \rightarrow 0$ из (3) получим

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = -p_1(t) \cdot \lambda + p_2(t) \cdot \mu_{12} + p_3(t) \cdot \mu_{23} + p_4(t) \cdot \mu_{34}.$$

Аналогично составляются уравнения для остальных состояний системы. В результате получим следующую систему линейных дифференциальных уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dp_1(t)}{dt} = -p_1(t) \cdot \lambda + p_2(t) \cdot \mu_{12} + p_3(t) \cdot \mu_{23} + p_4(t) \cdot \mu_{34} \\
 \frac{dp_2(t)}{dt} = p_1(t) \cdot \lambda - p_2(t) \cdot (\lambda + \mu_{12}) + p_5(t) \cdot \mu_{25} + p_6(t) \cdot \mu_{36} \\
 \frac{dp_3(t)}{dt} = -p_3(t) \cdot (\lambda + \mu_{23}) + p_5(t) \cdot \mu_{15} + p_7(t) \cdot \mu_{37} \\
 \frac{dp_4(t)}{dt} = -p_4(t) \cdot (\lambda + \mu_{34}) + p_6(t) \cdot \mu_{16} + p_7(t) \cdot \mu_{27} \\
 \frac{dp_5(t)}{dt} = -p_5(t) \cdot (\lambda + \mu_{15} + \mu_{25}) + (p_2(t) + p_3(t)) \cdot \lambda + p_8(t) \cdot \mu_{38} \quad (4) \\
 \frac{dp_6(t)}{dt} = -p_6(t) \cdot (\lambda + \mu_{16} + \mu_{36}) + p_4(t) \cdot \lambda + p_8(t) \cdot \mu_{28} \\
 \frac{dp_7(t)}{dt} = -p_7(t) \cdot (\lambda + \mu_{27} + \mu_{37}) + p_8(t) \cdot \mu_{18} \\
 \frac{dp_8(t)}{dt} = -p_8(t) \cdot (\lambda + \mu) + (p_5(t) + p_6(t) + p_7(t)) \cdot \lambda + p_9(t) \cdot \mu \\
 \frac{dp_i(t)}{dt} = p_{i-1}(t) \cdot \lambda - p_i(t) \cdot (\lambda + \mu) + p_{i+1}(t) \cdot \mu \quad (i = 9, \dots, 7+n) \\
 \frac{dp_{8+n}(t)}{dt} = p_{7+n}(t) \cdot \lambda - p_{8+n}(t) \cdot \mu
 \end{array} \right.$$

Решение системы дифференциальных уравнений (4) при условии нормировки $\sum_{i=1}^{n+8} p_i = 1$, и некоторых начальных условиях даст нам полную информацию о рассматриваемой системе массового обслуживания. Для получения предельных вероятностей в стационарном режиме, перейдем в (4) к пределу при $t \rightarrow \infty$. Обозначая $p_i = \lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t)$, получим

$$\begin{cases}
 0 = -p_1 \cdot \lambda + p_2 \cdot \mu_{12} + p_3 \cdot \mu_{23} + p_4 \cdot \mu_{34} \\
 0 = p_1 \cdot \lambda - p_2 \cdot (\lambda + \mu_{12}) + p_5 \cdot \mu_{25} + p_6 \cdot \mu_{36} \\
 0 = -p_3 \cdot (\lambda + \mu_{23}) + p_5 \cdot \mu_{15} + p_7 \cdot \mu_{37} \\
 0 = -p_4 \cdot (\lambda + \mu_{34}) + p_6 \cdot \mu_{16} + p_7 \cdot \mu_{27} \\
 0 = -p_5 \cdot (\lambda + \mu_{15} + \mu_{25}) + (p_2 + p_3) \cdot \lambda + p_8 \cdot \mu_{38} \\
 0 = -p_6 \cdot (\lambda + \mu_{16} + \mu_{36}) + p_4 \cdot \lambda + p_8 \cdot \mu_{28} \\
 0 = -p_7 \cdot (\lambda + \mu_{27} + \mu_{37}) + p_8 \cdot \mu_{18} \\
 0 = -p_8 \cdot (\lambda + \mu) + (p_5 + p_6 + p_7) \cdot \lambda + p_9 \cdot \mu \\
 0 = p_{i-1} \cdot \lambda - p_i \cdot (\lambda + \mu) + p_{i+1} \cdot \mu \quad (i = 9, \dots, 7+n) \\
 0 = p_{7+n} \cdot \lambda - p_{8+n} \cdot \mu
 \end{cases} \quad (5)$$

Из решения системы (5) с учетом условия нормировки легко найти показатели эффективности обработки судов.

Пропускную способность ППК принято оценивать на продолжительном отрезке времени, как правило, не менее года, с учетом перерывов в работе по метеорологическим причинам и необходимости ремонта части оборудования.

В соответствии с действующими Правилами [5] различают следующие виды ремонтных работ: техническое обслуживание (ТО-1, ТО-2); плановые ремонты (текущий, капитальный); аварийные ремонты. Техническое обслуживание проводят во время приема и сдачи смены, в период отсутствия грузовых работ и в редких случаях выводят машину из эксплуатации, но не более чем на одну-две смены в месяц. Поэтому такие работы практически не оказывают какого-либо влияния на пропускную способность МГФ комплекса и их можно исключить из рассмотрения.

Периодичность и продолжительность плановых ремонтов регламентируется действующими Правилами [5], их выполнение контролируется органами государственного надзора за техническим состоянием грузоподъемных машин. Продолжительность одного текущего и капитального ремонтов составляет около одного и трех месяцев соответственно. Периодичность определяется наработкой. Текущий ремонт порталых кранов проводится в среднем раз в два-три года, капитальный – через каждые пять текущих ремонтов. За свой жизненный цикл, например порталый кран, проходит, как правило, не более двух капитальных ремонтов. Если при наступлении календарного срока очередного ремонта техническое состояние перегрузочной машины допускает дальнейшую ее эксплуатацию, то планируемый ремонт может быть отсрочен. Перенос ремонта более чем на один трехмесячный срок вызывает нарекания со стороны надзорных органов.

Таким образом, плановые ремонты занимают достаточно много времени, а сроки их выполнения весьма строго контролируются и не

всегда могут быть отодвинуты на периоды пониженной загрузки ППК, поэтому их влияние на пропускную способность обязательно следует учитывать. Это можно легко выполнить, исключив из расчетов машины, находящиеся в ремонте.

Разобьем расчетный период времени T , на котором рассчитывается пропускная способность, на отдельные отрезки времени в зависимости от количества причальных установок $L = \overline{0, n}$, одновременно находящихся в плановом ремонте в данном периоде времени. Обозначим T_L продолжительность отрезка времени, на котором в ремонте будет

одновременно находиться L установок. Очевидно, что $\sum_{L=0}^n T_L = T$, а

$0 \leq n \leq N$. Величины L и T_L легко находятся из графика выполнения планово-предупредительного ремонта оборудования данного МГФ в рассматриваемом периоде.

Помимо плановых ремонтов машины также выводятся из эксплуатации на длительные промежутки времени из-за их аварийных ремонтов. Аварийная поломка отдельной машины на данном отрезке времени является случайным событием, а продолжительность ее ремонта – случайной величиной. Поэтому число машин A_L , одновременно находящихся в аварийном ремонте на отрезке T_L , также является случайной величиной, математическое ожидание которой $M[A_L]$ находится с учетом количества и параметров машин МГФ, их наработки, а также количества ремонтных постов в порту [6].

Тогда среднее число машин МГФ, находящихся в эксплуатации на отрезке времени T_L , составит $N_L = N - L - M[A_L]$. Пропускная способность МГФ на этом отрезке находится из выражения (1) исходя только из числа работоспособных машин $\Pi(N_L)$.

Пропускная способность МГФ совокупности взаимозаменяемых причалов за весь расчетный период времени T с учетом перерывов в работе по метеорологическим причинам и необходимости ремонта оборудования находится из выражения

$$\Pi_T = \sum_{L=0}^n T_L k_{mL} \Pi(N_L),$$

где k_{mL} - коэффициент использования рабочего времени причала по метеорологическим причинам на отрезке времени T_L [2].

Аналогичным образом, исключив из рассмотрения машины, находящиеся в ремонте на отдельных отрезках времени T_L , можно легко учесть влияние ремонта перегрузочного оборудования на показатели обслуживания судов при исследовании уровня загрузки ППК.

Для иллюстрации приведем численные результаты, когда очередь ограничена 12 судами, а ППК с прямолинейным МГФ состоит из трех причалов с девятью установками производительностью 50 т/ч каждая. Средняя загрузка судна равна 10000 т, верхняя граница концентрации – три установки на судно. В этом случае средние условные интенсивности обработки судов на причалах, равны

$$\begin{aligned} \mu_{12} = \mu_{23} = \mu_{34} = \mu_{15} = \mu_{25} = \mu_{16} = \mu_{36} = \mu_{27} = \mu_{37} &= 0,0153846, \\ \mu_{18} = \mu_{28} = \mu_{38} &= 0,0122448. \end{aligned}$$

В рассматриваемом примере по мере увеличения загрузки ППК наблюдается сравнительно небольшой рост среднего времени грузовой обработки судна с 65,126 ч до 80,001 ч при стремительном увеличении времени ожидания на рейде с 0,012 ч до 132,780 ч и времени стоянки судна в порту с 65,139 ч до 212,781 ч. Показатели обслуживания судов практически не зависят от k_s при загрузке менее 0,33–0,38, их заметное ухудшение происходит только при переходе через это барьерное значение (табл. 1, рис. 1).

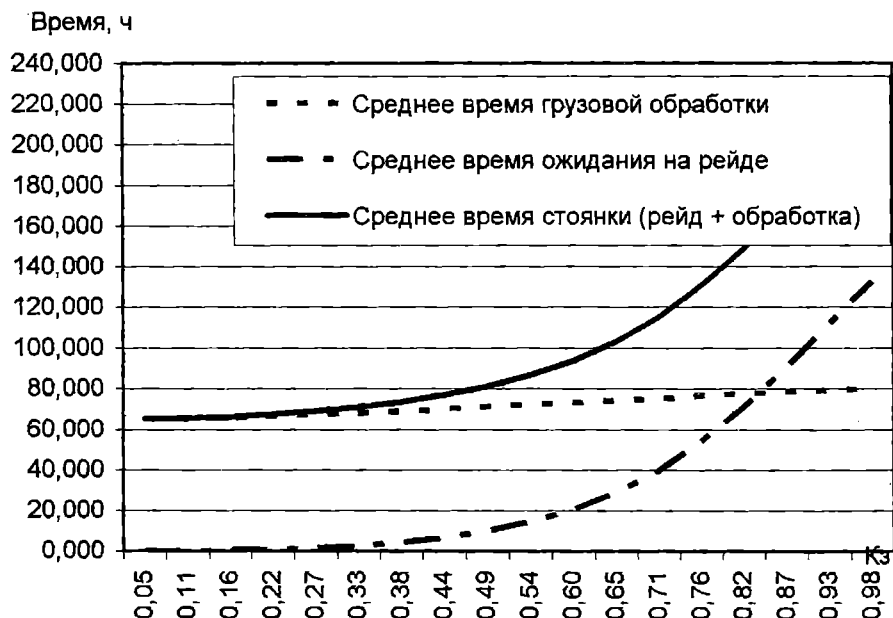


Рис. 1. Изменение времени грузовой обработки, ожидания на рейде и стоянки судна в порту от загрузки ППК

Таблица 1. Изменение показателей обслуживания судов от загрузки ППК

Коэффициент занятости причалов ППК	Интенсивность судопотока, судно/ч	Вероятность нахождения на ППК ни одного судна	Вероятность нахождения на ППК одного судна	Вероятность нахождения на ППК двух судов	Вероятность нахождения на ППК трех судов	Вероятность того, что на рейде есть хоть одно судно	Вероятность отказа	Среднее число судов на ППК (без рейда)	Среднее время грузовой обработки, ч	Среднее время ожидания на рейде, ч	Среднее время стоянки (рейд + обработка), ч
0,05	0,002	0,878	0,114	0,007	0,114	0,000	0,000	0,130	65,126	0,012	65,139
0,11	0,004	0,770	0,200	0,026	0,200	0,000	0,000	0,262	65,467	0,097	65,564
0,16	0,006	0,675	0,263	0,051	0,263	0,002	0,000	0,396	65,976	0,326	66,302
0,22	0,008	0,591	0,307	0,080	0,307	0,005	0,000	0,534	66,619	0,774	67,393
0,27	0,010	0,515	0,335	0,109	0,335	0,011	0,000	0,675	67,371	1,523	68,894
0,33	0,012	0,448	0,349	0,136	0,349	0,022	0,000	0,820	68,210	2,674	70,884
0,38	0,014	0,388	0,353	0,161	0,353	0,038	0,000	0,971	69,122	4,348	73,470
0,44	0,016	0,334	0,347	0,180	0,347	0,061	0,001	1,125	70,093	6,711	76,804
0,49	0,018	0,285	0,333	0,195	0,333	0,092	0,003	1,285	71,112	9,981	81,093
0,54	0,020	0,241	0,313	0,203	0,313	0,132	0,005	1,449	72,170	14,462	86,632
0,60	0,022	0,201	0,287	0,205	0,287	0,183	0,009	1,617	73,256	20,559	93,815
0,65	0,024	0,165	0,257	0,201	0,257	0,246	0,016	1,790	74,359	28,785	103,144
0,71	0,026	0,133	0,224	0,189	0,224	0,320	0,024	1,964	75,464	39,701	115,164
0,76	0,028	0,104	0,189	0,172	0,189	0,404	0,034	2,138	76,547	53,768	130,315
0,82	0,030	0,079	0,153	0,150	0,153	0,496	0,044	2,308	77,578	71,069	148,647
0,87	0,032	0,057	0,119	0,124	0,119	0,591	0,054	2,465	78,518	91,011	169,529
0,93	0,034	0,040	0,089	0,098	0,089	0,682	0,062	2,604	79,334	112,211	191,545
0,98	0,036	0,027	0,063	0,074	0,063	0,764	0,065	2,719	80,001	132,780	212,781

На основании полученной в данной работе зависимости показателей эффективности обслуживания судов от степени загрузки ППК при данных фиксированных параметрах процесса можно легко найти оптимальную загрузку комплекса, при которой достигается максимум прибыли в системе «порт-перевозчики-клиенты». Пользуясь такой методикой, можно решить и обратную задачу – оптимизировать параметры процесса при данной загрузке ППК, например, число причалов и количество перегрузочных установок на них, находить наилучший вариант организации дисциплины очереди и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малаксиано А.А. Математическая модель развития парка стационарного оборудования порта // *Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць*. – Одеса: ОНМУ, 2003. – Вип. 12. – С. 147-155.
2. *Нормы технологического проектирования морских портов. ВНТП 01-78 / Минморфлот. М.: ЦРИА "Морфлот", 1980. – 122 с.*
3. Малаксиано А.А. Математическая модель задачи определения верхней границы концентрации технологических линий на судах с вертикальным способом обработки // *Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць*. – Одеса: ОНМУ, 2002. – Вип. 8. – С. 176-184.
4. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
5. *Правила технічної експлуатації підіймально-транспортного устаткування морських портів. КНД 31.4.002-96. Ч. 1. – Одеса: Півден НДІМФ. – 98 с.*
6. Зубко Н.Ф. Расчет среднего значения суммарного бюджета рабочего времени парка одинаковых машин // *Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць*. – Одеса: ОНМУ, 2003. – Вип. 12. – С. 156-163.

УДК 624.04:539.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ГИБКИХ ПОДПОРНЫХ СТЕНКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С. Ф. Клованич

Введение. На базе конечноэлементного программного комплекса «CONCORD» выполнен нелинейный анализ системы шпунтовая стенка-грунт. Грунт рассматривался как сплошная физически нелинейная среда, механические свойства которой описаны в работах [4,5]. Определяющие соотношения для грунта получены в развитии идей А.А.Илюшина [2] и Г.А.Гениева [3]. Программное обеспечение комплекса включает библиотеку плоских и осесимметричных элементов различных типов, а также стержневых шарнирных и бесшарнирных элементов, которые используются для моделирования работы шпунтовой стенки. Физическая и геометрическая нелинейность раскрывается шаговым или шагово-итерационным методом. Моделируются также такие факторы как уплотнение, дилатация грунта, поровое и гидростатическое давление. С помощью специальных одноузловых элементов моделируется трение между стенкой и грунтом и нарушение сцепления на определенных этапах нагружения.

Описание модели. Предлагается вариант феноменологической модели прочности и деформирования, учитывающий физическую нелинейность, дилатацию, уплотнение материала в процессе деформирования, различную сопротивляемость на сжатие и растяжение. Модель является деформационной, а ее построение осуществляется в два этапа. Сначала моделируется прочность материалов, т.е. строится поверхность прочности в пространстве напряжений, затем формулируются соотношения связи напряжений с деформациями, в которых основные параметры находятся с помощью соответствующих предельных поверхностей. Использование модели предполагается в шаговых методах расчета, когда прослеживаются все этапы напряженного состояния конструкций или системы, от начальной вплоть до разрушения. Рассмотрим оба этапа построения модели.

Известно, что условие прочности должно описывать выпуклую и гладкую поверхность, симметричную относительно диагонали пространства главных напряжений $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Строится эта поверхность, обычно, в местной цилиндрической системе координат z, ρ, φ , связанной с исходной $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ следующими соотношениями:

$$z = \sqrt{3}\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3);$$

$$\rho = \sqrt{3\tau_0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

$$\cos \theta = (3 + \mu) / 2 \sqrt{3 + \mu^2},$$

где σ_0, τ_0 - октаэдрические нормальные и касательные напряжения;

$\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ - параметр Лодэ-Надаи, характеризующий вид

напряженного состояния;

θ - угол вида напряженного состояния.

Другими словами, эта поверхность описывается уравнением вида $F(\sigma_0, \tau_0, \mu) \equiv 0$, которое обычно строится на базе опытных данных при частных видах напряженных состояний способом, предложенным М.М.Филоненко-Бородичем [1]. Сначала формулируются две кривые $\tau_1(\sigma_0)$ и $\tau_2(\sigma_0)$, соответствующие экстремальным значениям $\mu = 1$ ($\theta = 0^\circ$) и $\mu = -1$ ($\theta = 60^\circ$), аппроксимирующих экспериментальные данные, полученные из опытов при $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ и $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Затем осуществляется интерполяция для значений угла θ (параметра Лодэ-Надаи), находящихся между двумя предельными случаями. Характерные сечения поверхности представлены на рис. 1.

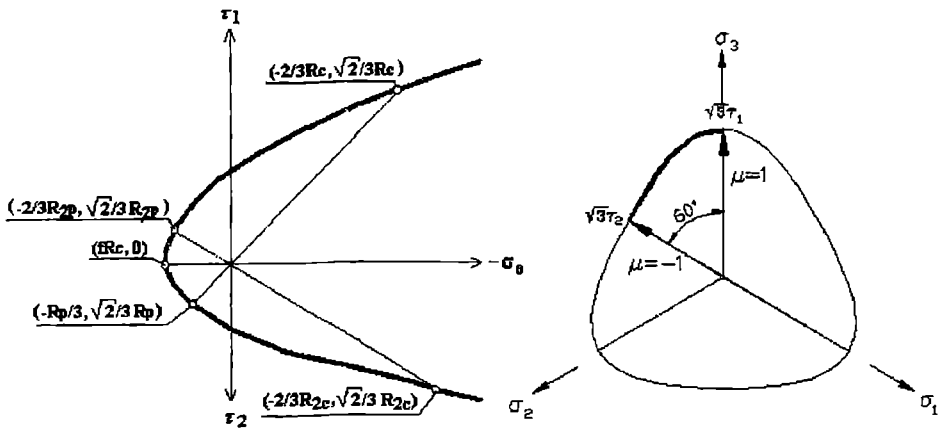


Рис. 1. Характерные сечения поверхности прочности

Графики функций $\tau_1(\sigma_0)$ и $\tau_2(\sigma_0)$ (рис.1) имеют ряд характерных точек. Так, кривая $\tau_1(\sigma_0)$ пересекает ось σ_3 в точке, соответствующей пределу прочности при одноосном сжатии — R и плоскость $\sigma_1 - 0 - \sigma_2$ в точке, соответствующей пределу прочности при равномерном двухосном растяжении R_{2p} . Кривая $\tau_2(\sigma_0)$ пересекает плоскость $\sigma_2 - 0 - \sigma_3$ в точке, соответствующей пределу прочности при равномерном двухосном сжатии — R_2 , и ось σ_1 в точке одноосного растяжения R_p . Координаты перечисленных точек показаны на рис.1.

Кроме того, обе кривые пересекаются в точке с координатами $(fR, 0)$, соответствующей трехосному равномерному растяжению. Функции $\tau_1(\sigma_0)$ и $\tau_2(\sigma_0)$ представим в наиболее общем виде

$$\tau_1 = AR_c \left(\frac{\sigma_0}{R_c} - f \right)^\alpha; \quad \tau_2 = BR_c \left(\frac{\sigma_0}{R_c} - f \right)^\beta, \quad (1)$$

позволяющем при различных значениях постоянных коэффициентов получить частные случаи, соответствующие различным вариантам существующих условий прочности. Коэффициенты, входящие в уравнение (1) получаются подстановкой координат характерных точек (рис.1)

$$\alpha = \frac{\ln(m_p \chi)}{\ln\left(\frac{f - 2/3 m_p \chi}{f + 1/3}\right)} \leq 1; \quad \beta = \frac{\ln(\chi / m_c)}{\ln\left(\frac{f - \chi/3}{2/3 m_c + f}\right)} \leq 1; \quad A = \frac{\sqrt{2}}{3} \left(-\frac{1}{3} - f\right)^{-\alpha}$$

$$B = \frac{\sqrt{2}}{3} \chi \left(\frac{\chi}{3} - f\right)^{-\beta}; \quad m_p = \frac{R_{2p}}{R_p}; \quad m_c = \frac{R_{2c}}{R_c}; \quad \chi = \frac{R_p}{R_c}.$$

Для интерполяции между значениями

$$\mu = 1 (\theta = 0) \quad \text{и} \quad \mu = -1 (\theta = 60^\circ)$$

предлагается следующее выражение:

$$\tau_\theta = \tau_1 - 8(\tau_1 - \tau_2) \sin^2 \frac{\theta}{2} \cos \theta, \quad (2)$$

удовлетворяющее условию выпуклости и гладкости сечений поверхности прочности плоскостями $\sigma_\theta = const$.

Таким образом, в описанном способе построения поверхности прочности требуется пять независимых параметров материала R_c, R_p, R_{2c}

R_{2m} f , соответствующих частным случаям напряженного состояния. По мере накопления экспериментальных данных по различным материалам количество независимых параметров может быть уменьшено при помощи эмпирических формул, связывающих эти зависимости между собой.

Отметим также, что большинство известных предельных поверхностей могут быть получены как частные случаи соотношения (2). Так, приняв $\alpha \equiv \beta \equiv 1$, $A \equiv B \equiv \text{tg} \varphi_0$, можно получить известный критерий Кулона для грунтов

$$\tau_0 = \sigma_0 \text{tg} \varphi_0 + c_0, \quad (3)$$

где $\text{tg} \varphi_0 = -\sqrt{\frac{3}{2}} \sin \varphi$, $c_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} c \cos \varphi$, φ - угол внутреннего трения, c - сцепление.

Деформационные зависимости получены на базе теории малых упругопластических деформаций А.А.Ильюшина [2] с использованием следующих основных гипотез классической теории:

- 1- материал считается изотропным и однородным;
- 2 - деформации формоизменения нелинейны, т.е. связь между компонентами девiatorов напряжений и деформаций нелинейна;
- 3 - нагружение считается простым и соблюдается соосность тензоров напряжений и деформаций.

В общем виде физические соотношения записываются так:

$$\sigma_0 = 3K \varepsilon_0; \quad \tau_0 = 2G\gamma_0, \quad (4)$$

где $\varepsilon_0 = 1/3(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$,

$$\gamma_0 = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} + \frac{2}{3} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) -$$

октаэдрические деформации, K и G - нелинейные функции объемного модуля и модуля сдвига.

В основу модели положена зависимость между октаэдрическими касательным напряжением и сдвигом, которая записывается так (рис.2):

$$\xi = \frac{\tau_0}{\hat{\tau}_0} = \frac{\lambda \eta}{1 + A\eta + B\eta^2 + C\eta^3}, \quad (5)$$

где $\eta = \frac{\gamma_0}{\hat{\gamma}_0}$; $\lambda = 2G_0 \frac{\hat{\gamma}_0}{\hat{\tau}_0}$; $C = \lambda \frac{\xi_r - 1}{(\eta_r - 1)^2} - \frac{1}{\eta_r}$; $B = 1 - 2C$; $A = C + \lambda - 2$.

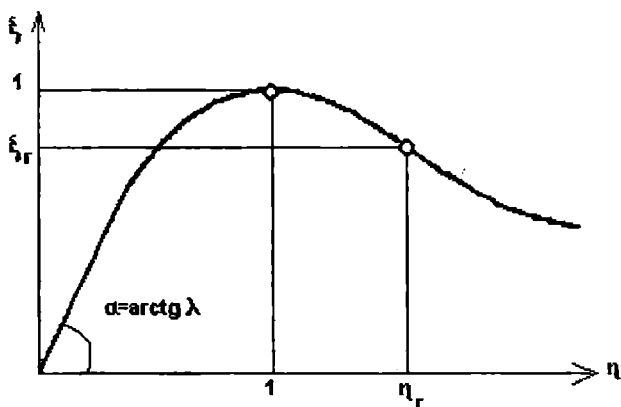


Рис. 2. Исходная диаграмма

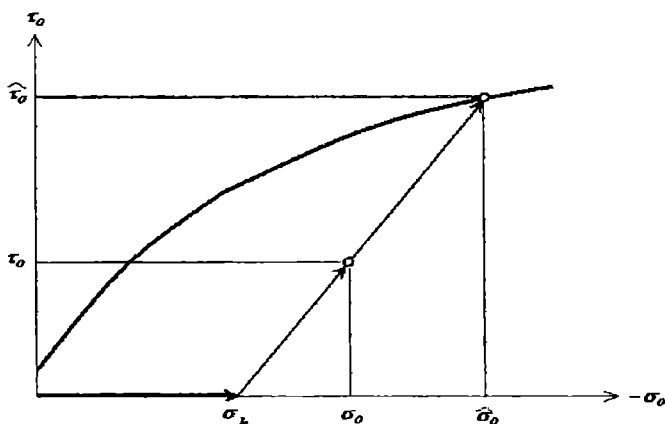


Рис. 3. Определение предельных значений

Здесь $\hat{\tau}_0$ и $\hat{\sigma}_0$ предельные значения, соответствующие исчерпанию прочности материала; G_0 – начальное значение модуля сдвига; η_r и ξ_r – координаты некоторой характерной точки на кривой, устанавливаемые из опытов, изменяя которые можно регулировать наклон ниспадающего участка кривой. Из выражения (2) несложно получить выражение для модуля сдвига

$$G = G_0 f_g(\tau_0), \quad (6)$$

в котором функция нелинейности равна

$$f_g(\gamma_0) = f_g(\eta) = 1/(1 + A\eta + B\eta^2 + C\eta^3). \quad (7)$$

В соответствии с принятыми гипотезами объемные деформации также нелинейны. Будем полагать, что их нелинейность обусловлена влиянием объемных октаэдрических деформаций, дилатацией и уплотнением материала в процессе деформирования (для грунтов). Для учета влияния перечисленных эффектов введем соответствующие функции нелинейности f_g , f_d , f_u , а секущий модуль объемных деформаций представим в виде

$$K = K_0 f_k(\varepsilon_0) f_d(\tau_0) f_u(\sigma_0), \quad (8)$$

где K_0 – начальное значение объемного модуля.

Функция $f_k(\varepsilon_0)$ учитывает влияние величины октаэдрических деформаций на объемный модуль, т.е. собственно нелинейность объемных деформаций. Ее выражение может быть также записано в виде

$$(7), \text{ в котором, однако } \eta = \frac{\varepsilon_0}{\hat{\varepsilon}_0}; \lambda = 3K_0 \frac{\hat{\varepsilon}_0}{\hat{\sigma}_0}.$$

Если нелинейность деформирования приводит к уменьшению значений модулей при росте напряжений, т.е. функция (7) убывающая, то уплотнение материала ведет к их нарастанию, сначала незначительному, затем, по мере приближения к предельному состоянию, весьма существенному. Поэтому ее описание должно осуществляться с помощью непрерывно возрастающих функций. Для этих целей можно также использовать выражение (6), поменяв в нем местами аргумент и функцию, т.е.

$$f_u(\sigma_0) = f_u(\xi) = 1 + A\xi + B\xi^2 + C\xi^3, \quad (9)$$

где $\xi = \frac{\sigma_0}{\hat{\sigma}_0}$; $\lambda = 3K_0 \frac{\hat{\varepsilon}_0}{\hat{\sigma}_0}$, остальные параметры те же, что и в формуле (5).

Функцию $f_d(\tau_0)$, учитывающую эффект дилатации, представим в виде

$$f_d(\tau_0) = f_d(\xi) = \frac{3(1 - \eta_0)K_0\lambda\xi}{\lambda(\xi + \xi_0)f'_d(\xi') - \eta_0},$$

где $f'_d(\xi') = 1 + A\xi' + B\xi'^2 + C\xi'^3$, $\xi' = \xi + \xi_0$, ξ_0, η_0 – координаты точки, соответствующей началу процесса деструкции (принято $\xi_0 = 0,5$, $\eta_0 = f'_d(\xi_0)$).

В приведенные выражения входят значения предельных характеристик прочности $\hat{\sigma}_0, \hat{\tau}_0$ соответствующие вершине диаграммы. Эти характеристики находятся с помощью поверхности прочности (2). Алгоритм вычисления координат точки на предельной поверхности, соответствующей текущему нагружению, представлен на рис.3. Здесь σ_0 точка, соответствующая окончанию процесса гидростатического сжатия.

Обычно полагается, что для предельных деформаций существует своя предельная поверхность, которая получается аффинным преобразованием поверхности прочности с коэффициентами преобразования λ .

Описанная деформационная модель была реализована в пакете прикладных программ "Concord" [6], предназначенном для решения нелинейных задач с помощью МКЭ шаговым и шагово-итерационным методами. Тестирование модели осуществлялось в составе программного комплекса сначала для бетона, затем для различных типов грунтов. Результаты тестирования, приведенные в работах [4, 5], показали достаточную надежность предлагаемой модели и пригодность ее для практических расчетов.

Примеры расчетов

Пример 1. Рассматривался расчет моделей бойверка толщиной 3,2 мм и 8 мм, результаты экспериментальных исследований которых приведены в работе [7]. Расчетная схема модели полностью соответствует экспериментальным образцам и приведена на рис.4. Характеристики грунта: модуль деформаций $E=1,5$ МПа; коэффициент поперечных деформаций $\nu=0,35$; объемный вес $\rho =15,8$ кН/м³; угол внутреннего трения $\varphi = 33^\circ$; сцепление $c=0$. Результаты расчетов в виде напряжений в грунте приведены на рис.5. На рис.6 приведены эпюры изгибающих моментов в стенке и ее горизонтальные перемещения при действии только собственного веса грунта, а также собственного веса и дополнительной поверхностной нагрузки 5 кПа. Здесь приведены опытные данные. На рис.7 приведены результаты расчета образца со стенкой толщиной 8 мм.

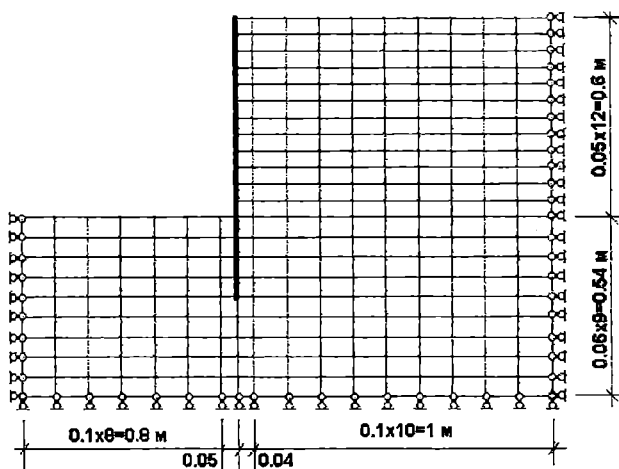


Рис. 4. Расчетная схема бойверка

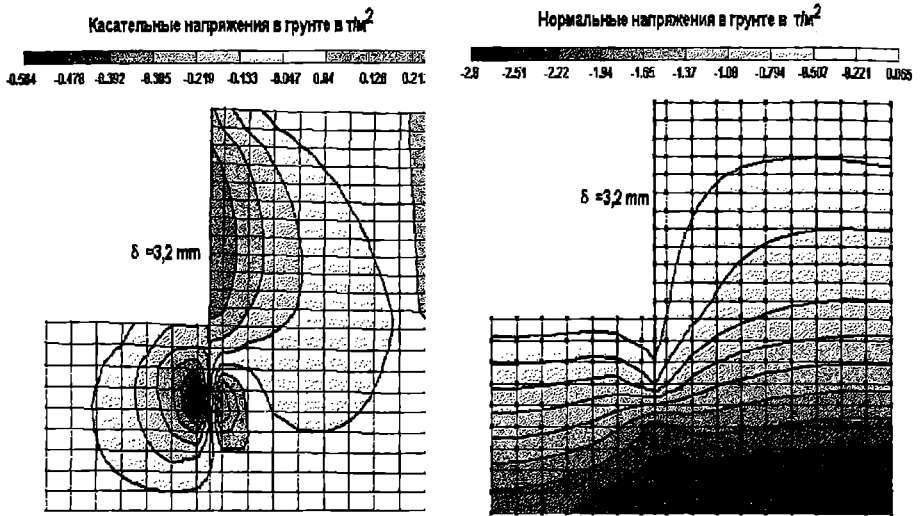


Рис. 5. Напряжения в грунте от действия собственного веса

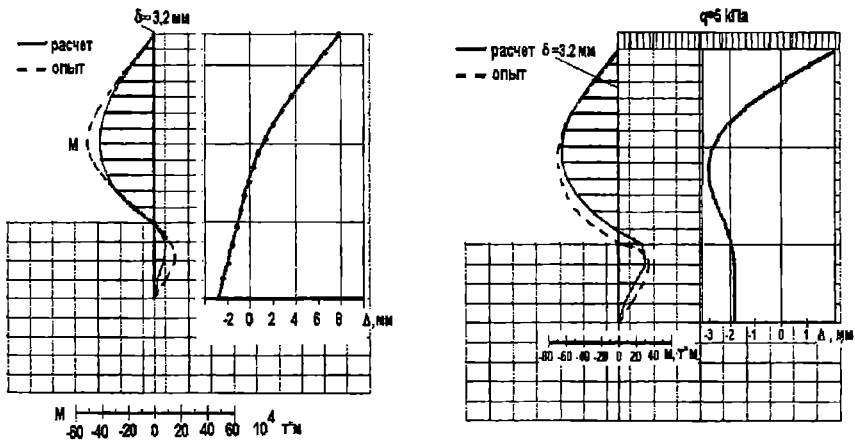


Рис. 6. Изгибающие моменты и горизонтальные перемещения стенки толщиной 3,2 мм

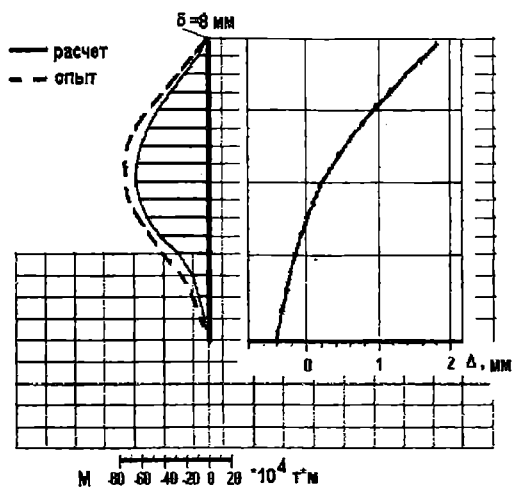


Рис. 7. Изгибающие моменты и горизонтальные перемещения стенки толщиной 8 мм

Пример 2. В этом примере рассматривался расчет гибкой анкерной стенки набережной порта, результаты натуральных наблюдений которой приведены в работе [8]. Расчетная схема набережной приведена на рис. 8. Материал стенки – железобетон с $E_b = 2000 \text{ МПа}$, анкер – стальной диаметром 75 мм. Результаты расчетов изгибающих моментов и активного давления грунта на стенку сопоставлялись с результатами натуральных наблюдений, и приведены на том же рисунке.

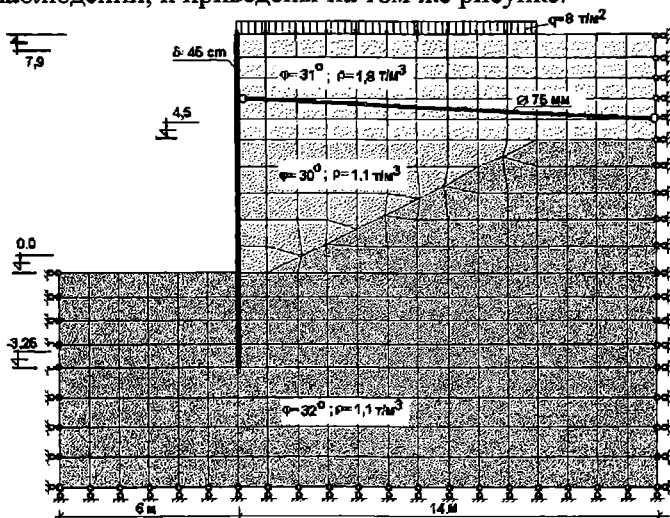
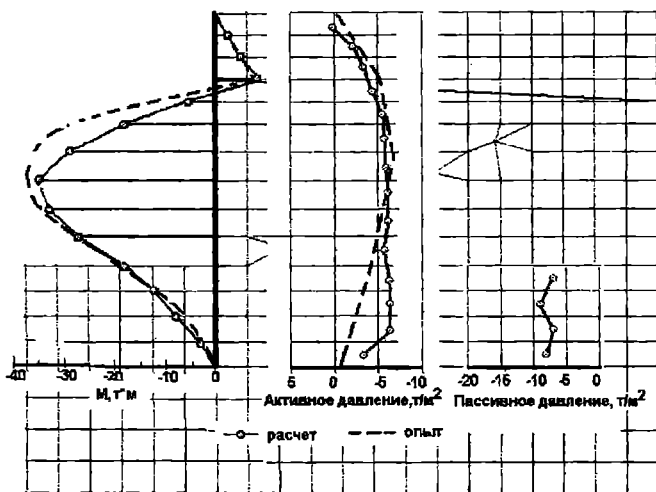


Рис. 8. Результаты расчетов анкерной стенки набережной



Продолжение рис. 8

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиненко-Бородич М.М. Об условиях прочности материалов, обладающих различным сопротивлением растяжению и сжатию // Инж. сборник, 1954. - Вып. 19. - С. 36-48.
2. Ильюшин А.А. Пластичность. - М.: ГИТЛ, 1948. - 376 с.
3. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. - 316 с.
4. Клованич С.Ф. Программа "CONCORD" для решения геотехнических задач методом конечных элементов // Вісник Одеського національного морського університету. Одеса: ОНМУ, 2003. - Вып. 10. - С. 39-46.
5. Клованич С.Ф. Модель прочности и деформаций бетона и грунта при сложном напряженном состоянии // Строительные конструкции / Межвед. н.-т. сб. - Киев: НИИСК, 2003. - Вып. 59. - С. 163-170.
6. Клованич С.Ф. «Concord». Программный комплекс решения геотехнических задач методом конечных элементов: Руководство пользователя. - Одесса: ОНМУ, 2003. - 63 с.
7. Перевязкин Ю.А. Лабораторные исследования отчерпанных* и засыпных одноанкерных бьефов // Сб. научн. тр. - Л., 1967. - С. 172-177.
8. Гуревич В.Б. Речные портовые гидротехнические сооружения. - М.: Транспорт, 1969. - 416 с.

УДК 624.131 + 624.154

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕНЕТРАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПАЛЬ В ГЛИНИСТИХ ГРУНТАХ

Ю.Л. Винников, В.С. Яковлєв

Постановка проблеми. Визначення несучої здатності забивних паль-тертя практично реалізують за польовими дослідженнями (статичні та динамічні випробування дослідних паль, зондування ґрунту тощо) [3. С. 14-19] або розрахунковим методом [3. С. 6-9], які мають певні недоліки.

Перші з них досить дорогі та тривалі, а загальним недоліком методів другої групи є те, що значення розрахункового опору ґрунту R_s і f для глинистих ґрунтів приймають залежно від їх показника текучості I_L із градацією через 0,1. При такій зміні I_L значення R_s й f відрізняються в окремих випадках у 1,5-2,5 рази. Якщо врахувати, що точність визначення природної вологості 0,1%, а вологості на межі текучості та розкочування 1%, то для супісків точність визначення I_L складає 0,11-0,20, для глини 0,05-0,07. Похибка при визначенні I_L може призвести до помилок при розрахунку несучої здатності у 2-3 рази. При визначенні R_s і f не враховується також щільність ґрунту.

Аналіз останніх досліджень, де започатковано розв'язання проблеми. Раніше нами були оприлюднені пропозиції, щодо визначення показників міцності глинистого ґрунту за допомогою пенетраційних випробувань з розрахунком інваріантної величини питомого опору пенетрації [1. С. 234-241]. Численні статистичні обробки підтвердили існування чіткої залежності між питомими опорами зрушення і пенетрації, якщо досліди проведені на зразках генетично однорідного ґрунту з однаковими фізичними властивостями.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Якщо розрахунковий метод визначення несучої здатності забивних паль-тертя з використанням таблиць є занадто узагальненим, не враховує генетичних особливостей конкретного глинистого ґрунту й здебільшого дає занижену величину, то польові методи досить складні технологічно, відзначаються значною вартістю і через невелику кількість випробувань не завжди обґрунтовані статистично.

Формулювання цілей статті. Пропонується комбінований метод визначення несучої здатності паль-тертя, що включає рекомендації

діючих норм проектування пальових фундаментів у глинистих ґрунтах і використовує penetраційні випробування зразків, відібраних у шурфах або свердловинах при інженерно-геологічних вишукуваннях на ділянці будівництва об'єкта.

Виклад основного матеріалу дослідження. На основі залежностей між питомими опорами penetрації R і зрушення τ , які мають вигляд

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\tau}{\bar{R}_n} = (A \cdot \sigma + B), \quad (1)$$

де A та B – коефіцієнти, котрі визначають методами математичної статистики за підсумками знаходження середньої величини питомого опору penetрації \bar{R}_n і значень питомого опору плоскому зрушенню τ для різних величин вертикального тиску σ , – а також рекомендацій [3. С. 23], які для визначення несучої здатності паль за міцністю ґрунтів основи пропонують розрахунковий опір τ визначати за формулою [2. С. 17]

$$\tau = \zeta \cdot \sigma_{zg} \cdot \operatorname{tg} \varphi_I + c_I, \quad (2)$$

де ζ – коефіцієнт бічного тиску; $\zeta = 0,7$; φ_I , c_I – розрахункові величини кута внутрішнього тертя і питомого зчеплення, що визначають за ДСТУ Б В.2.1-4-96 методом консолідованого дренажного зрушення; σ_{zg} – вертикальний тиск від власної ваги водонасиченого глинистого ґрунту.

Можна прийняти узагальнене рівняння для розрахунку τ з використанням (1) і (2)

$$\tau = \bar{R}_n \cdot (\zeta \cdot \sigma_{zg} \cdot A + B) \cdot \frac{1}{\gamma_g}, \quad (3)$$

де γ_g – коефіцієнт надійності, $\gamma_g = 1,4$.

Залежність (3) встановлюють окремо для усіх інженерно-геологічних елементів, які прорізує палі і ототожнюють величину τ з величиною f , яку в розрахунковому методі визначення несучої здатності палі-тертя встановлюють за табл. 2 [3. С. 8], залежно від I_L і $H_{\text{сер}}$.

Щодо розрахункового опору глинистого ґрунту під нижнім кінцем палі R_s , то його можна визначити альтернативно:

якщо $0,6 > I_L > 0,2$, то за виразом

$$R_s = 96,15 \cdot \tau - 946,1 \text{ кПа}, \quad (4)$$

або за виразом

$$R_s = \beta_1 \cdot q_s = \beta_1 \cdot \bar{R}_n \cdot 19,88, \quad (5)$$

де β_1 – коефіцієнт переходу від q_s до R_s за табл. 15 [3. С. 19]; q_s – середнє значення опору ґрунту під наконечником зонду з кутом конічності $\alpha = 30^\circ$; 19,88 – коефіцієнт переходу від \bar{R}_n – питомого опору пенетрації наконечником з кутом конічності $\alpha = 30^\circ$ до q_s при $\alpha = 60^\circ$ [3. С. 17].

Наведемо приклад визначення несучої здатності забивної залізобетонної палі С8-30 на ділянці будівництва одного з житлових будинків у Полтаві. Голова палі розташована на глибині 0,6 м від денної поверхні майданчика.

Відомості про геологічну будову ділянки і результати узагальнення лабораторних випробувань наведено в табл. 1.

* – на рівні вістря палі.

За відомостями табл. 1 несуча здатність палі С8-30 з використанням формули (8) та (25) [3. С. 6, 18]

$$F_d = 1 \cdot [1 \cdot 2720 \cdot 0,09 + 1,2 \cdot (0,6 \cdot 33 + 1,6 \cdot 34 + 2 \cdot 32 + 2 \cdot 40 + 1,3 \cdot 47)] = 580 \text{ кН}$$

За табл. 1 та 2 і за тією ж формулою (8) [3. С. 7-8] несуча здатність палі $F_d = 411 \text{ кН}$.

Висновки з дослідження і перспективи дальшого пошуку в данному напрямі. Запровадження пенетраційного методу дослідження властивостей глинистих ґрунтів і встановлення зв'язку його результатів із результатами традиційних методів визначень міцності ґрунту дає підстави для дальшого розвитку випробувань глинистих ґрунтів конічним наконечником з метою удосконалення проектування пальових

наконечником з метою удосконалення проектування пальових фундаментів і, зокрема, розрахунку несучої здатності паль. При цьому відомі ідеї, що апробовані практикою, використовуються як база для комбінованого методу встановлення несучої здатності паль в глинистих грунтах.

Таблиця 1. Підсумки пенетраційних випробувань, результатів плоского зрушення та їх узагальнення, прив'язані до інженерно-геологічного розрізу

ПЕ	Товщина шару, м	Відстань від поверхні, м	Відстань від поверхні до середини шару	σ_{zg} , кПа	R, кПа	Параметри рівняння (1)		Визначення опору ґрунту τ , кПа за виразом (3)	Визначення опору ґрунту під кінцем палі R_s , кПа
						A	B		
1	0,6	0,6							На глибині 8,1 м: $R_s =$ $=96,15 \cdot 49,3 -$ $-946,1 = 3794$ кПа;
2	0,6	1,2	0,9	16,2	212	1,707	0,198	33	
3	1,6	$I_L =$ 0,09 2,8	2,0	36,0	203	1,949	0,187	34	
4	5,3	4,8	3,8	68,4	187	2,363	0,128	32	$q_s =$ $=19,88 \cdot 0,187 =$ $= 3720$ кПа;
		$I_L = 0,48$ 6,8	5,8	104,4				40	
		8,1	7,45	134,1 145,8				47 49,3	

Перевагою викладених пропозицій є:

- використання матеріалів реальних експериментів зі зразками ґрунту конкретної ділянки будівництва, а отже урахування генетичних особливостей окремих інженерно-геологічних елементів,

- за програмою випробувань зразки можна довести до будь-якого фізичного стану й, зокрема, до екстремального коефіцієнту водонасичення S_r ,

- можливість проведення експериментів в лабораторних умовах із зразками глинистого ґрунту, які відібрано в шурфах чи свердловинах і, таким чином, здійснення зменшення вартості польових досліджень.

У перспективі планується накопичення матеріалів для їх детального порівняння з польовими методами визначення несучої здатності піль.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зоценко М.Л., Яковлев А.В., Винников Ю.Л. *Пенетраційні експрес-методики визначення фізико-механічних властивостей зв'язних ґрунтів*// Сб. научн. тр.: *Диагностика в строительстве*. Днепропетровск: ПГАСиА, 2002. – Вып. 18. – С. 234-241.
2. Разоренов В.Ф. *Определение строительных свойств грунтов методами пенетрации и вращательного среза*. – К.: Будівельник, 1966. – 136 с.
3. СНиП 2.02.03-85. *Свайные фундаменты*/ Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.

УДК 624.15

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФУНДАМЕНТОВ ВБЛИЗИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ

В.А. Гришин, В.И. Снисаренко

Данная проблема возникает при освоении новых территорий в районах существующей застройки. Примыкание новых зданий к ранее построенным может вызвать значительные повреждения и разрушения последних. Для обеспечения сохранности существующих сооружений необходимы дополнительные мероприятия по уменьшению возможных их неравномерных осадок. Следовательно, должны быть разработаны методики расчета по определению возникающих перемещений существующих зданий, обусловленных соседним строительством. С такой проблемой столкнулись при новом строительстве в условиях городской застройки в Москве [1], Санкт-Петербурге [2] и Киеве. В данной работе исследуется как изменяются деформации и напряжения в грунтовом массиве под существующим сооружением и вблизи его, если отрыть котлован под строительство нового здания. Определение дополнительных перемещений в массиве от нагрузок возводимого сооружения будет рассмотрено в следующей статье.

Расчетная схема исследуемой задачи показана на рис. 1.

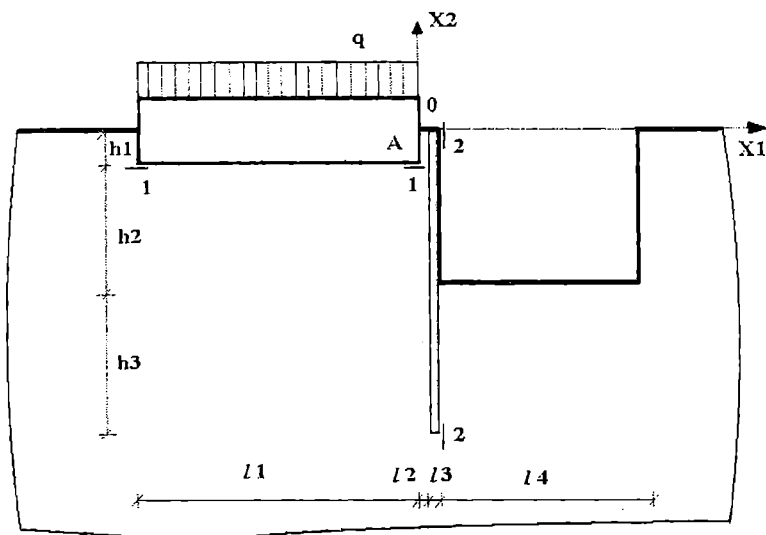


Рис. 1. Расчетная схема

Известно, что грунты даже при небольших нагрузках переходят в упругопластическое состояние. В данном случае они также работают в условиях сложного нагружения. Так вначале они находились только под воздействием собственного веса, затем на них действовала нагрузка от ранее построенного здания, далее было возведено подпорное шпунтовое ограждение и отрыт котлован, которые также изменили их напряженно-деформированное состояние. Поэтому используется теория пластического течения, базирующаяся на принципе максимума Мизеса, а не деформационные теории пластичности, обоснованные только для простого нагружения [3]. Более подробно эта теория применительно к сооружениям, взаимодействующим с грунтовой средой, изложена, например, в [4]. Здесь приведем только основные уравнения.

На основании принципа виртуальной работы, уравнение равновесия в интегральной векторной форме записывается как

$$\int_{\Omega} [\delta e]^T \sigma d\Omega + \int_{\Omega} [\delta u]^T Q d\Omega - \int_{S_q} [\delta u]^T q dS = 0 \quad (1)$$

Такая форма его записи позволяет расширить класс дифференцируемых функций, на которых определяется обобщенное решение задачи. Компоненты тензора приращения деформации de_{ks} и компоненты вектора приращения перемещений du_k связаны между собой линейными соотношениями Коши

$$de_{ks} = \frac{1}{2} (du_{k,s} + du_{s,k}) \quad (2)$$

Принимаются малыми удлинения, сдвиги и углы поворота, что позволяет использовать постулат суммирования приращений деформаций, который разделяет общие приращения деформации de_{ks} на упругие de_{ks}^e и пластические de_{ks}^p

$$de_{ks} = de_{ks}^e + de_{ks}^p \quad (3)$$

Компоненты тензора приращения упругой деформации связаны с компонентами тензора приращения напряжений законом Гука

$$de_{ks}^e = C_{ksmn}^e d\sigma_{mn} \quad (4)$$

Компоненты тензора приращения пластической деформации в окрестности регулярной точки функции нагружения f определяются как

$$de_{ks}^p = d\lambda f_{,\sigma_{ks}}, \quad d\lambda = const > 0. \quad (5)$$

После преобразований уравнения состояния записываются в следующем виде:

$$d\sigma_{ks} = D_{ksmn}^{ep} de_{mn} \quad \text{при } f = 0, \quad d'f > 0; \quad (6)$$

$$d\sigma_{ks} = D_{ksmn}^e de_{mn} \quad \text{при } f = 0, \quad d'f \leq 0 \text{ или } f < 0.$$

Здесь D_{ksmn}^e - коэффициенты упругости деформируемой среды, $d'f$ - неполное приращение функции погружения,

$$D_{ksmn}^{ep} = D_{ksmn}^e - \frac{f_{,\sigma_{ks}} D_{ksmn}^e f_{,\sigma_{mn}} D_{ksmn}^e}{f_{,\sigma_{ks}} D_{ksmn}^e f_{,\sigma_{mn}} - f_{,\chi} \sigma_{te} f_{,\sigma_{te}}}, \quad (7)$$

χ - параметр упрочнения.

В качестве функции нагружения для грунтовых сред использовалось условие Кулона-Мора

$$\left(\sigma_0 - \frac{\sigma_i \sin \psi}{\sqrt{3}} \right) \sin \varphi + \sigma_i \cos \psi - c \cos \varphi = 0, \quad (8)$$

где σ_0, σ_i, ψ - инварианты тензора напряжений, их значения приведены в [4];

φ, c - соответственно, угол внутреннего трения и сцепление.

Для металлической шпунтовой стенки применялось условие Мизеса, а для железобетонной - условие Гениева [4].

Для решения полученных уравнений нелинейной краевой задачи на ЭВМ они методом конечных элементов преобразовались к системе алгебраических уравнений. Затем строился итерационный процесс для определения вектора перемещений с наперед заданной

точностью. Использовались восьмиузловые изопараметрические конечные элементы. Построение итерационного процесса выполнялись по модифицированному методу Ньютона-Контаровича [5]

$$\delta_{n+1} = K_m^{-1}(\delta_n), \quad (9)$$

где $K(\delta)$ - матрица жесткости системы;

m - номера итераций, на которых производилось обращение матрицы K . Система линейных алгебраических уравнений решалась фронтальным методом.

Для численных расчетов использовались следующие исходные данные:

модуль деформации грунта $E=25$ МПа;

коэффициент Пуассона $\mu=0,3$;

угол внутреннего трения $\varphi=28^\circ$;

сцепление $c=0,004$ МПа,;

плотность $\rho=0,0016$ кг/см³.

Для бетона подпорного сооружения:

$E_c=40000$ МПа, $\sigma_p=1,5$ МПа, $\sigma_c=17$ МПа, $\rho_c=0,0024$ кг/см³.

Приняты размеры:

$h_1=2$ м, $h_2=5$ м, $h_3=5$ м, $l_1=30$ м, $l_2=1$ м, $l_3=0,4$ м, $l_4=30$ м.

Грунт на глубине 42 м от подошвы фундамента существующего здания опирается на недеформированную скальную породу.

Вначале рассматривается только деформирование грунтового массива до возведения здания. Результаты расчета показали, что от собственного веса грунта произошла осадка его верхней границы на 41,931 см. При такой осадке началось строительство здания. Пластические области в грунте от действия его собственного веса не возникали. Принималось положение дневной поверхности грунтового массива до его деформирования за нулевую отметку.

После возведения здания при $q=0,05$ МПа произошли дополнительные перемещения в массиве. На рис. 2 в увеличенном масштабе жирными линиями показана общая картина его деформаций. Более тонкие линии отмечают его положение в недеформированном состоянии (до перемещений от собственного веса).

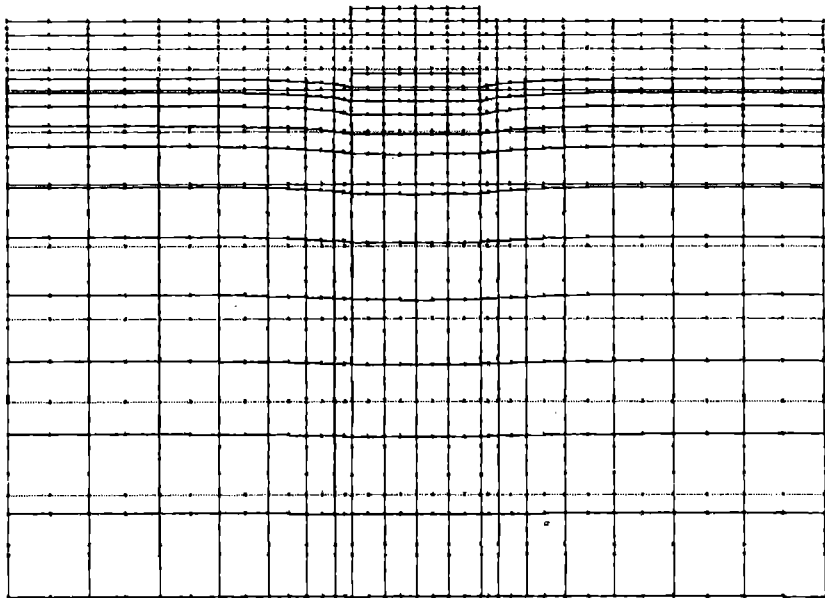


Рис. 2. Схема деформирования грунтового массива

На рис.3 показаны вертикальные перемещения в грунтовом массиве от подошвы фундамента на глубину 42 м. Осадка фундамента от недеформированного состояния массива (от нулевой отметки) составила 48,083 см, т.е. после возведения здания дополнительная осадка под его фундаментом увеличилась на 6,152 см.

На рис. 4 показаны пластические зоны в основании, которые образовались после строительства здания. Темные кружочки фиксируют точки Гаусса конечных элементов, которые находятся в пластическом состоянии. Численное интегрирование уравнений для определения напряжений выполнялось по девяти точкам Гаусса в каждом конечном элементе. Часто определяют напряженно-деформированное состояние массива от действия на него штампа, считая его невесомым. Был выполнен такой расчет, который показал, что в пластическое состояние перешла более обширная область его. Следовательно, действие собственного веса массива способствует выравниванию по величине главных напряжений, что приводит к уменьшению касательных напряжений, являющихся главным фактором образования в нем пластических зон. В этом случае дополнительная осадка фундамента увеличивается до 9,647 см.

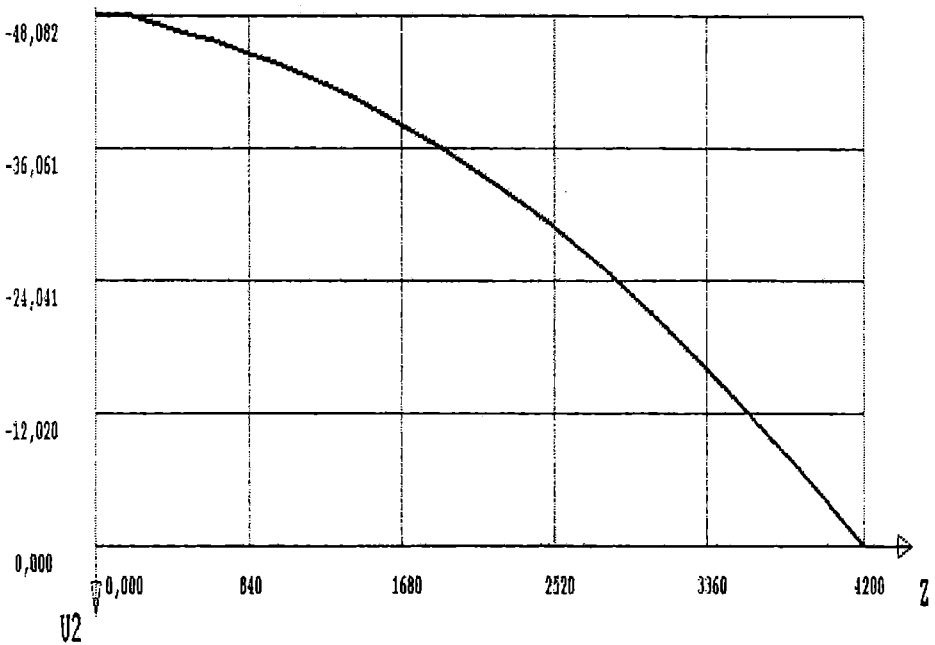


Рис. 3. Эпюра вертикальных перемещений грунтового массива под фундаментом здания от точки А до скальной породы (глубина 42 м)

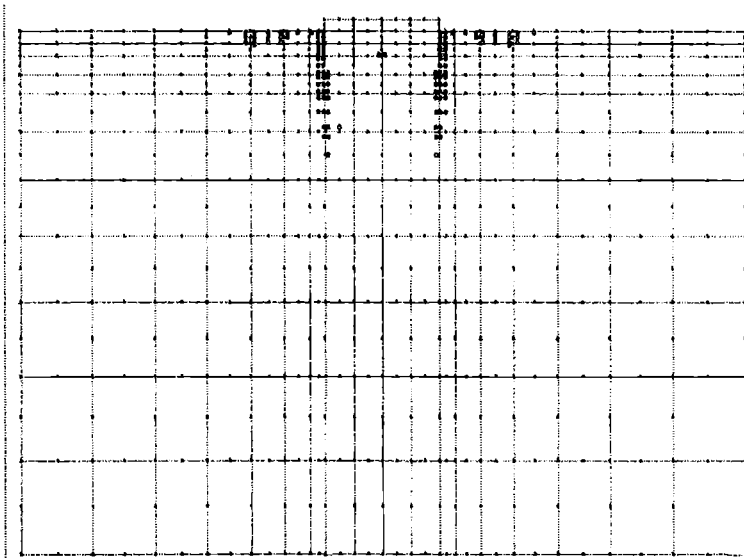


Рис. 4. Схема образования пластических зон в грунтовом массиве

На рис. 5 и рис. 6 приведены эпюры нормальных σ_{22} и касательных σ_{12} контактных напряжений в грунте под фундаментом после завершения строительства (сечения 1-1 на рис.1). Эпюры построены по точкам Гаусса конечных элементов (поэтому длина линии контакта составляет 2830,95 см, а не 3000 см). Оба напряжения увеличиваются по абсолютной величине к краям фундамента, но нормальные остаются в обоих случаях сжимающими, а касательные меняют знак.

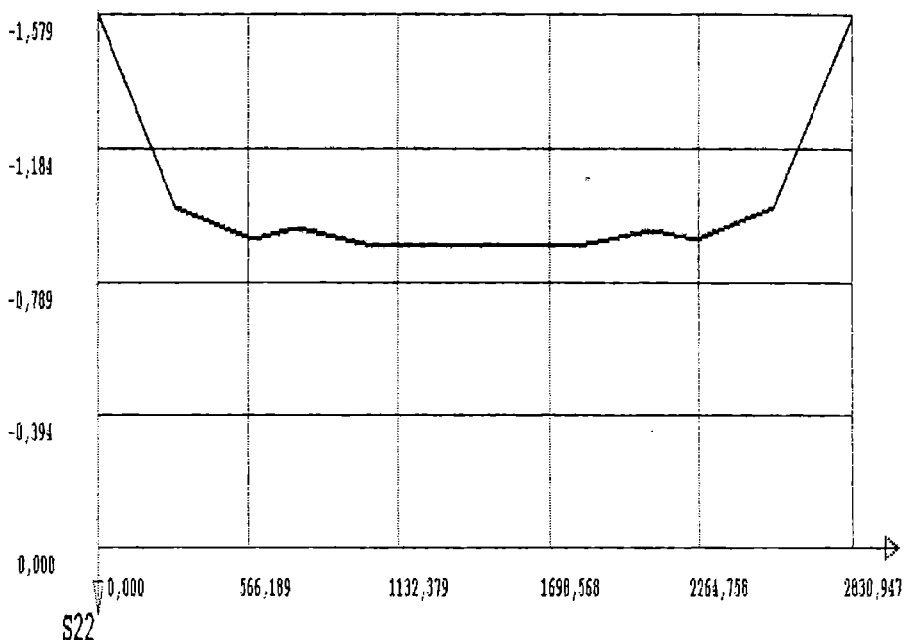


Рис. 5. Эпюра контактных напряжений σ_{22} по сечению 1-1
(в 10 МПа)

После строительства здания была возведена шпунтовая железобетонная стенка и отрыт котлован. На рис. 7 показана в увеличенном масштабе общая схема деформирования грунтового массива и фундамента здания к концу этого периода строительства. Происходит поднятие дна котлована и деформирование грунта за его пределами.

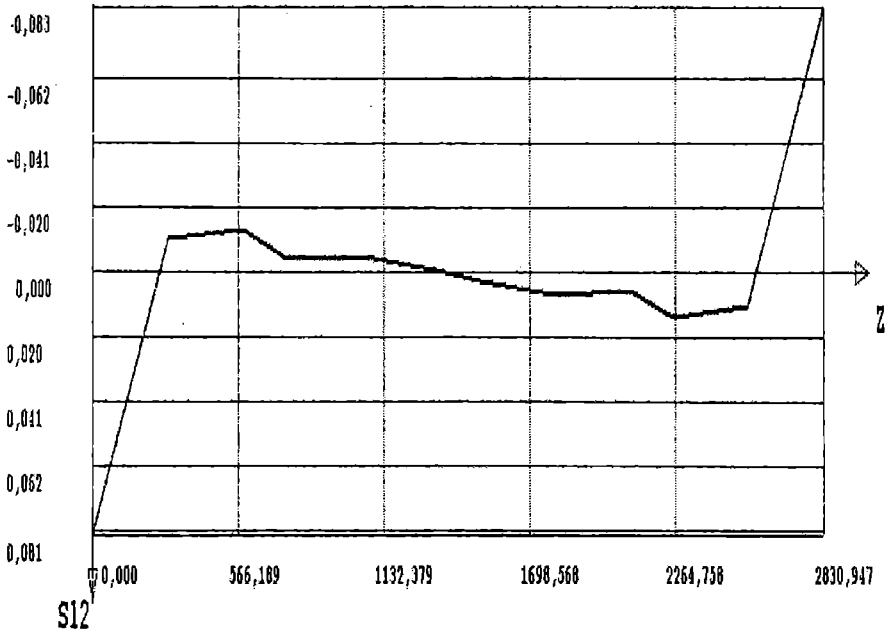


Рис. 6. Эюра контактных напряжений σ_{12} по сечению 1-1 (в 10 МПа)

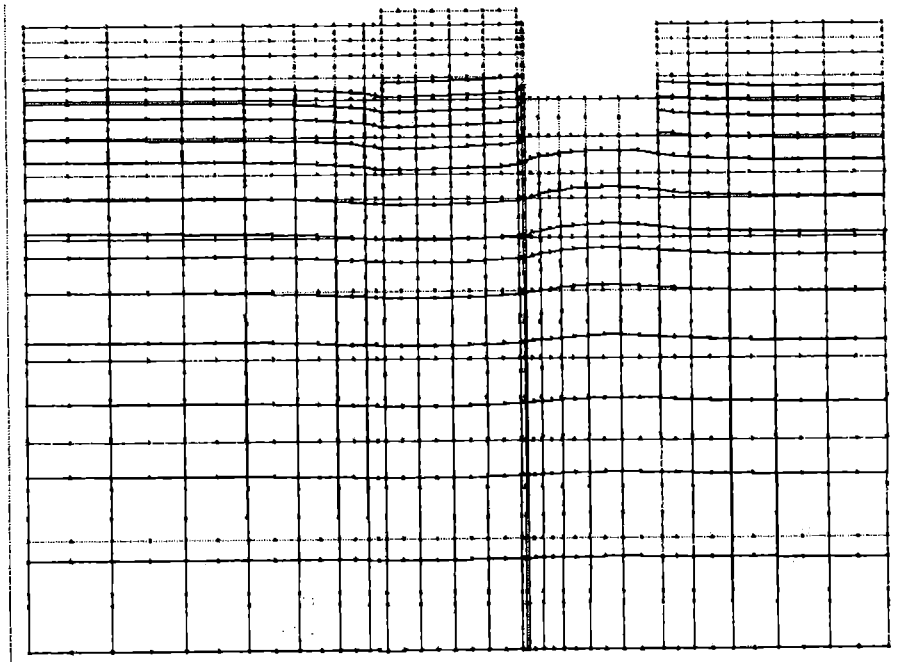


Рис. 7. Схема перемещений массива и фундамента после открытия котлована

На рис. 8 приведена схема образования пластических зон в грунте. В шпунте они не возникали. Пластические области расположены под краями фундамента, вокруг шпунтовой стенки и по краям котлована. Образование последних вызвано связанностью грунта и тем, что не учитывалась последовательность открытия котлована.

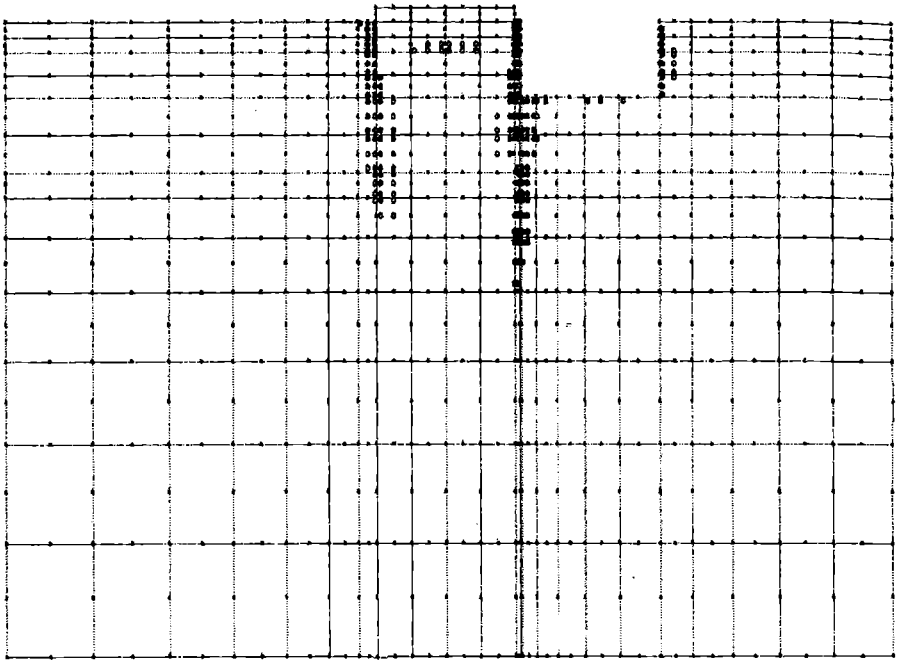


Рис. 8. Схема образования пластических зон в массиве после открытия котлована

Дополнительное вертикальное перемещение точки А на данном этапе строительства составило только 0,41 см. Горизонтальное перемещение шпунтовой стенки по сечению 2-2 показано на рис. 9. Из рисунка видно, что произошло ее смещение в сторону котлована и поворот против часовой стрелки. Это было вызвано горизонтальным распором грунта. Разница в перемещении концов стенки составила 0,708 см. Интересно отметить, что если производить расчет в той же последовательности: действие собственного веса, нагрузка от здания, считая шпунтовую стенку возведенной, а котлован открытым, то вертикальное перемещение точки А будет меньше ранее полученного на 3,12 см. Это вызвано тем, что шпунтовая стенка

препятствует горизонтальному деформированию грунта, вызванного давлением на него фундамента. Следовательно, возведение шпунтовых стенок по краям фундамента вызовет уменьшение его осадки.

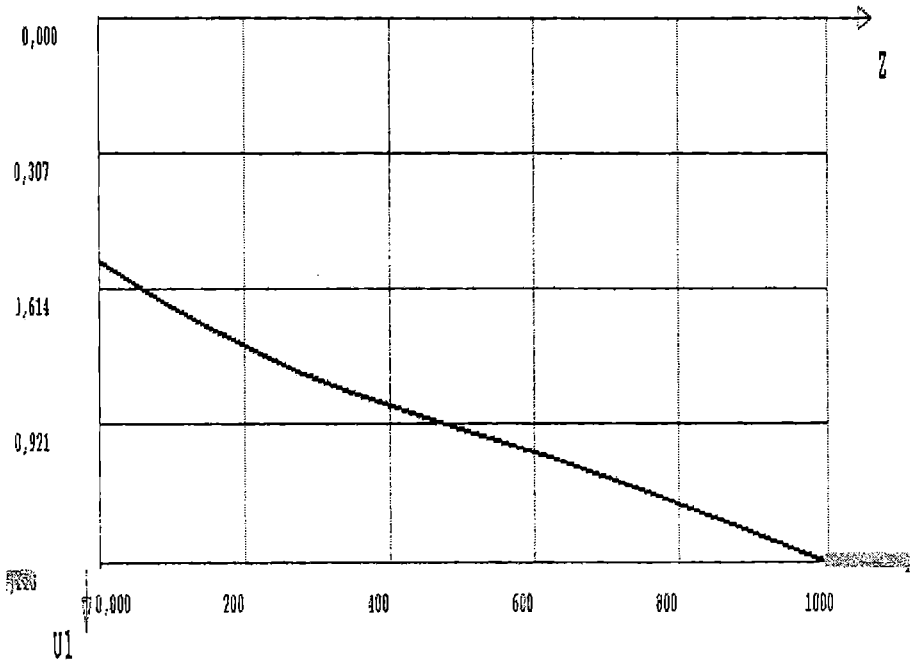


Рис. 9. Эпюра горизонтальных перемещений шпунтовой стенки по сечению 2-2

На рис. 10 и рис. 11 показаны эпюры контактных нормальных напряжений σ_{22} и касательных σ_{12} по сечению 1-1. Если сравнить эти эпюры с эпюрами рис. 5 и рис. 6, то видим, что эпюры σ_{22} качественно не изменились, произошло только некоторое увеличение напряжений по абсолютной величине. В эпюре σ_{12} произошло как качественное, так и количественное изменения, особенно её правой части, где напряжения стали положительными.

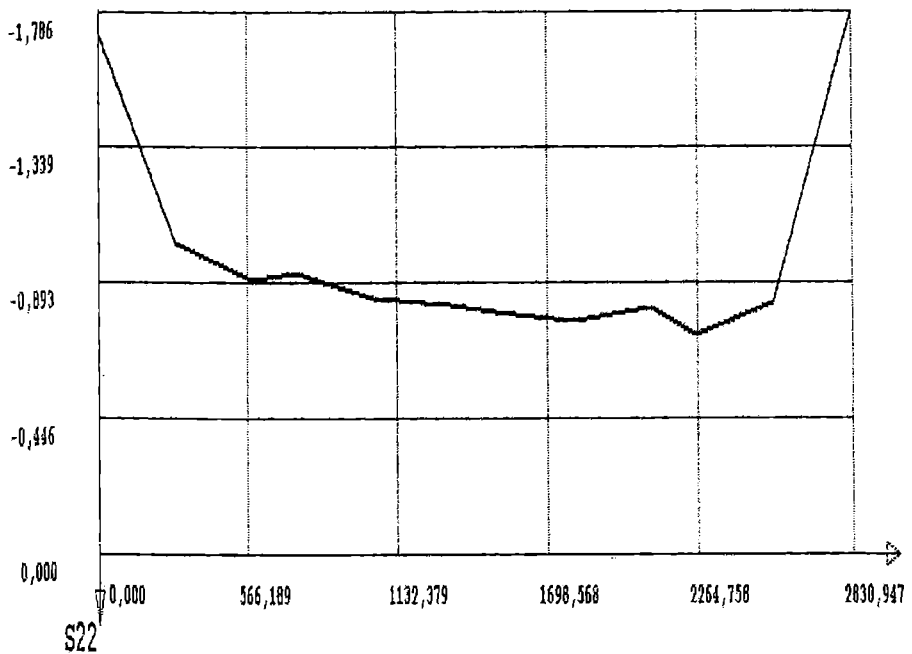


Рис. 10. Эюра контактных напряжений σ_{22} по сечению 1-1 (в 10 МПа)

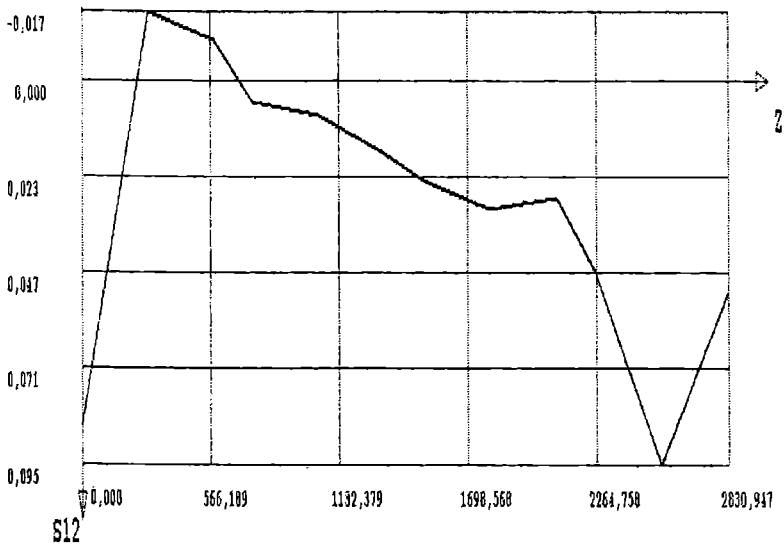


Рис. 11. Эюра контактных напряжений σ_{22} по сечению 1-1 (в 10 МПа)

На рис.12 приведена эпюра напряжений σ_{11} , которые определяют горизонтальное давление грунтовой среды на шпунтовую стенку. Их положительное значение в верхней области массива вызвано большим вертикальным смещением правой части фундамента по сравнению с таким же перемещением шпунтовой стенки.

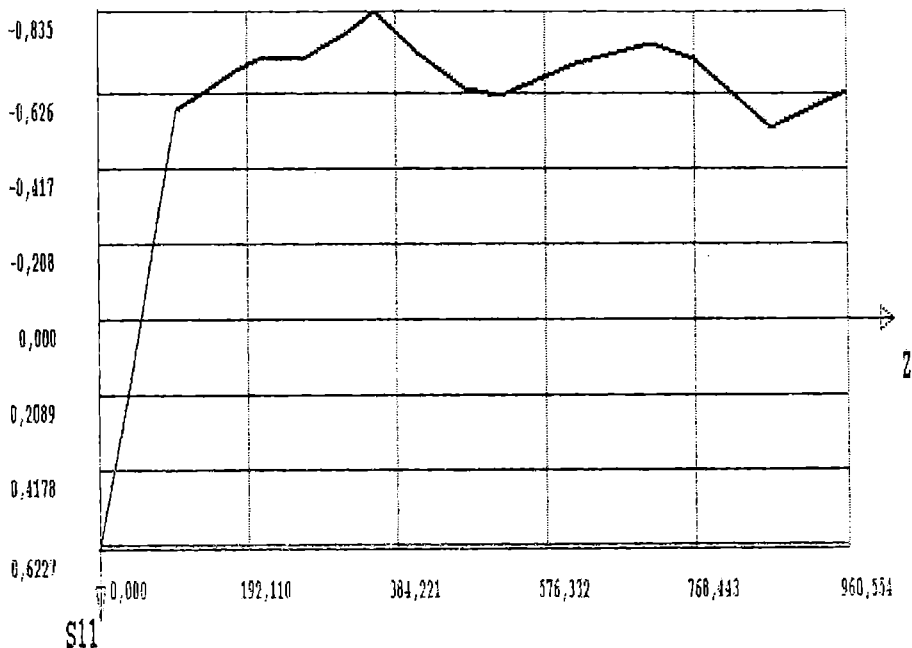


Рис. 12. Эпюра горизонтальных давлений грунта на шпунтовую стенку (в 10 МПа)

Приведенная методика и разработанный на ее основе программный комплекс для расчета на ЭВМ позволяют определять как напряжения, так и деформации в любой точке грунтового массива и фундамента ранее возведенного здания при разработке вблизи него котлована.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильичев В.А., Мариупольский Л.Г. и др. Отражение в новых нормах проектирования и устройства оснований, фундаментов и подземных сооружений особенностей строительства в условиях плотной городской застройки (на основе опыта разработки нормативных документов для г. Москвы) // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. - № 5. – С. 21-28.
2. Шашкин А.Г. Геотехнические критерии при проектировании сложной реконструкции и нового строительства в условиях городской застройки // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. - № 5. – С. 48-54.
3. Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И. Теория упрочняющегося пластического тела. – М.: Наука, 1971. – 231 с.
4. Гришин А.В., Федорова Е.Ю. Нелинейная динамика ограждающих сооружений. – Одесса: ОНМУ, 2002. – 240 с.
5. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. – М.: Мир, 1975. – 558 с.

УДК 624.15

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОПУСКНОМ СПОСОБЕ ИХ ВОЗВЕДЕНИЯ

А. В. Черных

В настоящее время используются подземные и полуподземные здания и сооружения самого различного назначения. Одним видом из них являются опускные колодцы. Основная нагрузка, воспринимаемая стенами опускных колодцев – это боковое давление грунта. Методика расчета таких конструкций [4] базируется на классической теории предельного напряженного состояния Кулона, которая предполагает плоский характер поверхностей обрушения. Из многолетнего опыта известно, что применение традиционных методов проектирования в ряде случаев приводит к снижению прочности таких сооружений. Подобный расчет не соответствует реальной работе опускного колодца, взаимодействующего с грунтовой средой, и не позволяет определить напряженно-деформированное состояние системы с учетом таких свойств, как упругость и пластичность грунтов и железобетона.

Изложим вкратце метод расчета, исключаяющий вышеуказанные недостатки. Система сооружение-грунтовая среда рассматривается как единое целое, при этом учитывается их совместная работа. Основные уравнения составлены на основе пластического течения, базирующегося на принципе максимума Мизеса, и имеют сложный вид [5]. Так как решение такой задачи без применения ЭВМ практически невозможно, разработан программный комплекс, в котором дискретизация краевой задачи выполнена методом конечных элементов. Итерационный процесс получения решения построен по модификациям метода Ньютона-Канторовича. Уравнения состояния упругопластических тел зависят от производных функции нагружения, для каждой среды используется своя функция. В рассматриваемом примере для грунтовой среды в качестве функции нагружения используется условие Кулона-Мора, а для железобетона – Г.А. Гениева.

Основные уравнения имеют следующий вид:

– статические уравнения в виде уравнения виртуальной работы

$$\int_{\Omega} \left[\left(\sigma_{ks}^{j-1} + Q_s^{j-1} \right) \delta u_s + \left(d\sigma_{ks,k}^j + dQ_s^j \right) \delta u_s \right] d\Omega + \int_{S_q} \left[\left(\sigma_{ks}^{j-1} n_k - q_s^{j-1} \right) \delta u_s + \left(d\sigma_{ks}^j n_k - dq_s^j \right) \delta u_s \right] ds = 0, \tag{1}$$

где Ω - объем системы; S – поверхность системы;

– геометрические уравнения, в которых симметричный тензор деформации E определяется через перемещения соотношениями Коши

$$e_{ks} = \frac{1}{2}(u_{k,s} + u_{s,k}). \quad (2)$$

Уравнение постулата суммирования приращений упругих и пластических деформаций имеет вид

$$de_{ks} = de_{ks}^{(e)} + de_{ks}^{(p)}. \quad (3)$$

Компоненты тензора упругой деформации связаны с компонентами тензора напряжений законом Гука

$$de_{ks}^{(e)} = C_{ksmn}^{(e)} d\sigma_{mn}. \quad (4)$$

Пластические деформации определяются следующим образом:

$$de_{ks}^{(p)} = d\lambda f_{oks}, \quad (5)$$

где $d\lambda = const > 0$;

f – функция нагружения.

После преобразований получаются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^{(ep)} de_{mn}, \text{ если } f = 0, d'f > 0; \\ d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^{(e)} de_{mn}, \text{ если } f = 0, d'f \leq 0 \text{ или } f < 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Для оценки напряженно-деформированного состояния системы выполним расчет опускного колодца и произведем сравнительный анализ данных, полученных на основе:

- расчетной программы, использующей разработанную модель;
- традиционного метода.

Расчетная схема представлена на рис. 1. Такого рода задача является осесимметричной. Численные результаты получены при следующих исходных данных: $R=8$ м; $B=1,2$ м; $b=1,0$ м; h_1-h_6 , соответственно, равны 1,96 м; 3,55 м; 0,8 м; 1,19 м; 0,5 м и 1,7 м. Грунты площадки строительства: I слой – насыпной грунт с $\gamma_1=19,3$ кН/м³, $\varphi_1=17^\circ$; II слой – песок с $\gamma_2=8,5$ кН/м³, $\varphi_2=25^\circ$; III слой – песок с $\gamma_3=9$ кН/м³, $\varphi_3=25^\circ$; IV слой – глина с $\gamma_4=9$ кН/м³, $\varphi_4=15^\circ$. Эксплуатационная нагрузка на поверхности грунта $q=40$ кПа.

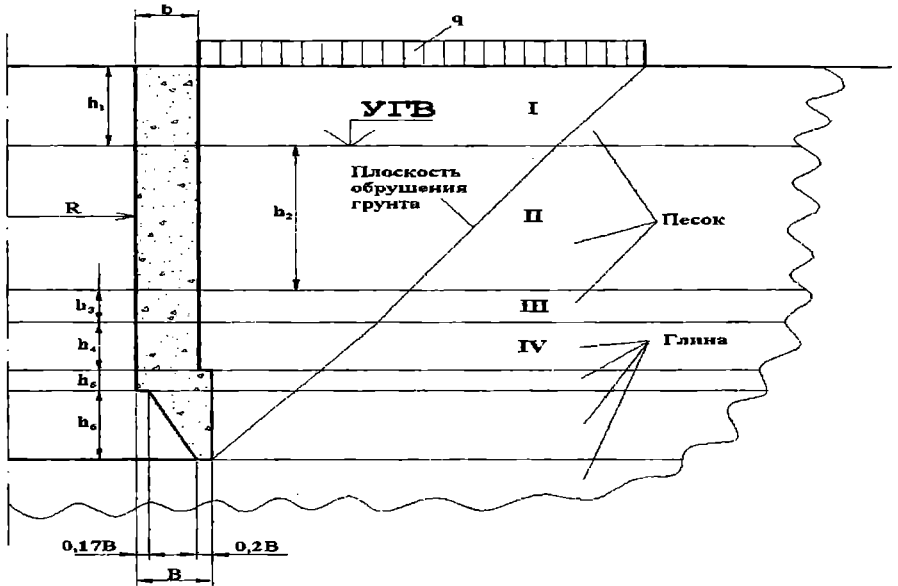


Рис. 1. Расчетная схема опускного колодца

На рис. 2 показаны эпюры давления на наружную стенку колодца при эксплуатации сооружения, полученные из расчета по теории Кулона и предложенной методике. В первом слое грунта эпюры имеют одинаковый качественный характер, но величины, определенные при помощи программного комплекса, вдвое больше найденных по теории Кулона. В нижележащих слоях значения и формы эпюр также существенно отличаются.

Один из авторов в [4] предлагает определять изгибающие моменты и сжимающие усилия для железобетонных стен колодцев при $1/12 \leq \delta/R \leq 1/5$ по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 M_{Ra} &= -0,1488 p_{ar} R^2 (k_u - 1); \\
 M_{Rb} &= 0,1366 p_{ar} R^2 (k_u - 1); \\
 N_{Ra} &= p_r R [1 + 0,7854 (k_u - 1)]; \\
 N_{Rb} &= p_r R [1 + 0,5 (k_u - 1)]; \\
 k_u &= \left(\sum p_r^{\max} / p_r \right)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где p_{γ}^{\max} - максимальная сумма горизонтальных давлений;

p_{ar} - горизонтальное боковое давление грунта, $p_{ar} = \sigma_{ar}$;

k_u – коэффициент неравномерности бокового давления;

R – расчетный радиус оболочки.

Конструкция рассчитывается по поясам – отдельным поперечным кольцевым сечениям.

Приведем численные значения, полученные по приведенным выше формулам и по предлагаемому методу. Для рассмотрения возьмем нижний пояс опускного колодца – с отметки $-8,00$ м до $-9,70$ м.

На отметке $-8,00$ м в железобетонной стенке $M_a = -84,1$ кНм, $N_a = 1148,8$ кН;

на отметке $9,00$ м $M_b = 77,2$ кНм, $N_b = 1130$ кН.

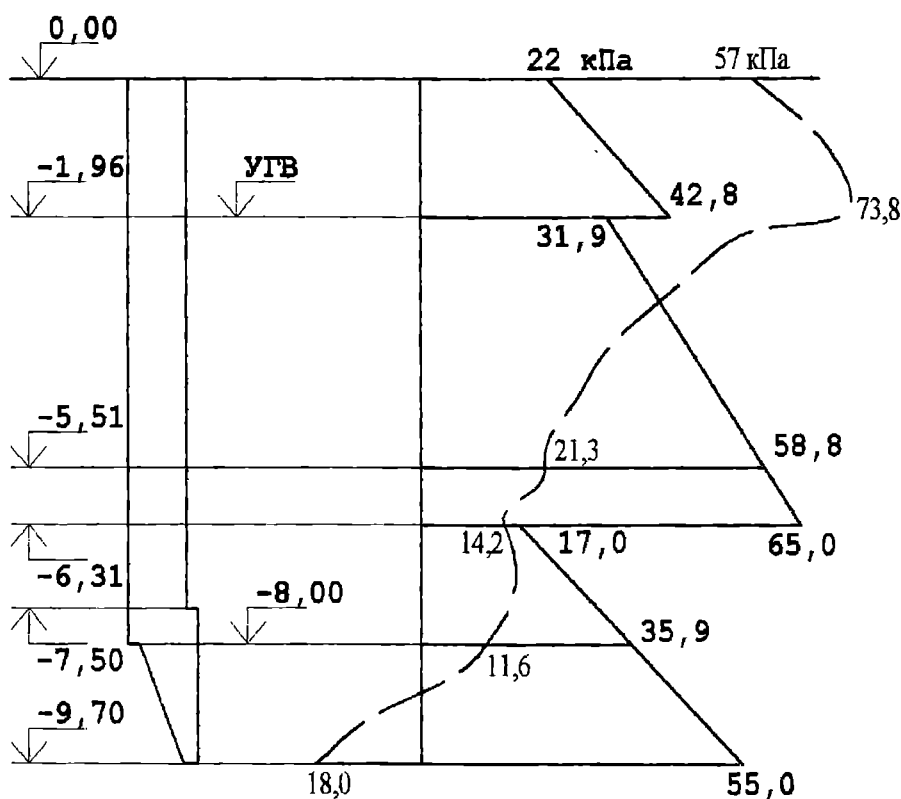


Рис. 2. Эпюры давления при эксплуатации сооружения

Исходя из данных, полученных при помощи программы, а именно величин напряжений в железобетонном поясе, вычислены следующие значения $M_a = -177,7$ кНм, $N_a = 260$ кН, $M_b = -37,9$ кНм, $N_b = 190,5$ кН. В обоих сечениях внутренняя сторона стенки испытывает растяжение, а наружная – сжатие, поэтому сжимающие вертикальные усилия найдены

как равнодействующие. Исходя из этого видно, что такого вида расчет позволяет выяснить, как работает сооружение в совокупности с окружающей грунтовой средой.

На рис. 3 представлены графики распределения нормальных напряжений в трех горизонтальных сечениях по высоте рассматриваемой конструкции, построенные по результатам расчета, полученным на основе предложенной методики. Анализируя характер эпюр, можно выяснить, перешел ли материал в пластическую стадию или нет. Распределение нормальных напряжений имеет линейный характер, это говорит о том, что стены опускного колодца работают в упругой стадии. В верхнем и нижнем сечениях, где эпюры имеют разные знаки, бетон работает как на сжатие, так и на растяжение. У отметки $-4,6$ м возникают лишь сжимающие напряжения.

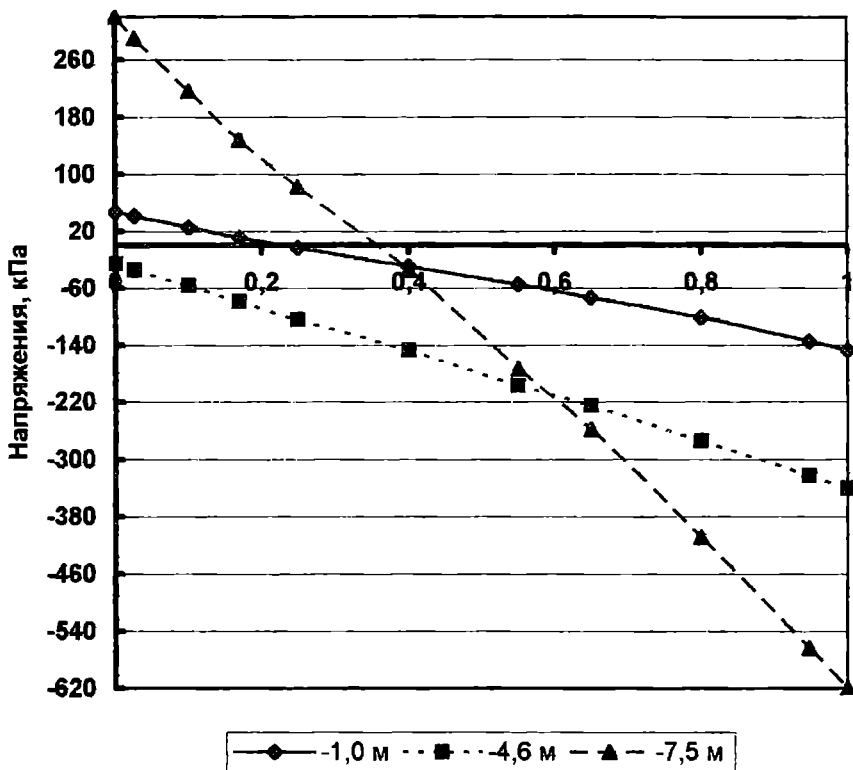


Рис. 3. Эпюры напряжений по высоте стенки

Предлагаемая методика и разработанный программный комплекс позволяют более точно отразить работу конструкции при взаимодействии с окружающей грунтовой средой и учесть упругопластические свойства материалов. Исходя из этого, можно повысить надежность сооружений при проектировании, а также выявить резервы несущей способности существующих конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
2. Гришин А. В., Дорофеев В. С. Нелинейная динамика конструкций, взаимодействующих с деформируемой средой. – Одесса: Астропринт, 2001. – 134 с.
3. Ивлев Д. Д., Бьковцев Г. И. Теория упрочняющегося пластического тела. – М.: Наука, 1971. – 231 с.
4. Тетиор А.Н., Логинов В.Ф. Проектирование и строительство подземных зданий и сооружений – Киев: Будивельник, 1990. – 167 с.
5. Черных А.В., Гришин В.А. Расчет заглубленных коробчатых конструкций //Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2003. - № 10. – С. 51-55.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МОДЕЛЕЙ СТАЛЬНЫХ ТРУБЧАТЫХ СВАЙ

Ю.А. Фортученко

Основой экспериментальной оценки поведения любой конструкции при испытаниях или в условиях эксплуатации является измерение и исследование механических характеристик, определяющих прочность и надежность материала, конструкции или грунта основания.

Для экспериментатора наибольший интерес представляет измерение напряжений прямыми методами, однако, в связи с рядом технических трудностей оценку напряженного состояния обычно осуществляют через деформации или другие сопутствующие изменению напряжений эффекты (изменение оптических, магнитных свойств, частотных характеристик и т.д.).

Измерение деформаций не вызывает принципиальных затруднений, в связи с чем получило широкое распространение. При этом для перехода к напряжениям используют известные зависимости, которые для так называемых упругих материалов имеют практически линейный характер.

Методы оценки напряженно-деформированного состояния элементов конструкций путем прямого измерения деформаций и напряжений называют тензометрическими, из которых наибольшее применение получили электротензометрические методы, основанные на использовании в качестве первичного средства тензорезисторов или тензодатчиков активного сопротивления.

При изучении напряженно-деформированного состояния моделей стальных трубчатых свай электротензометрическим способом возникает необходимость измерения деформаций свай без нарушения сцепления с грунтом, что можно выполнить путем наклейки тензодатчиков сопротивления на внутренней поверхности этих трубчатых элементов с двух противоположных сторон в плоскости изгиба свай. При этом модели свай следует погружать в грунт с заглушенным нижним концом, чтобы избежать попадания грунта во внутреннюю полость трубчатой сваи.

Предлагаемая методика наклейки тензодатчиков на внутренней поверхности полых деталей разработана в лаборатории теории расчета и физико-механических исследований конструкций из силикатного бетона ВНИИСТРОМ [1], применена автором при исследовании напряженно-деформированного состояния продольной и поперечной арматуры в балках из тяжелого силикатного бетона [2] и позволяет осуществить

наклейку тензодатчиков на внутренней поверхности модели трубчатой сваи после погружения ее в грунт основания на заданную отметку.

Суть методики состоит в том, что наклейку тензодатчиков на внутреннюю поверхность моделей стальных трубчатых свай можно выполнить при помощи вспомогательного устройства – пуансона (рис.1), который состоит из упругой резиновой трубки 1, направляющей трубки 2 и вентиля с ниппелем 7. Размеры составных частей пуансона подбирают в зависимости от длины и внутреннего диаметра модели трубчатой сваи.

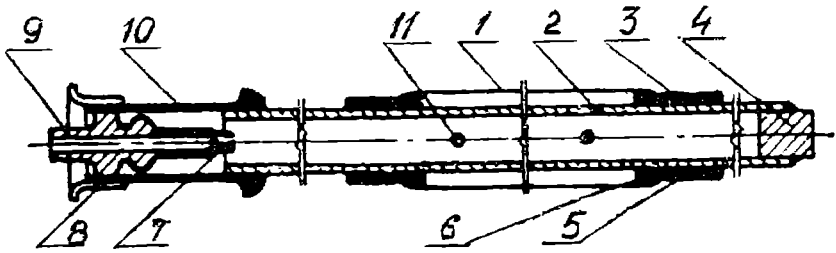


Рис.1. Пуансон для наклейки тензодатчиков

Вентиль, состоящий из сердечника 9, корпуса 10 и прижимной гайки 8 припаян к одному концу направляющей трубки, другой ее конец герметично закрыт сердечником 4. Упругая резиновая трубка надета на полую трубку 2, по концам изолирована лентой 6 и приклеена к ее поверхности; места склейки дополнительно закреплены проволокой 5. В стенке направляющего стержня выполнено отверстие 11 для подачи сжатого воздуха внутрь резиновой трубки.

Все тензодатчики наклеивают на внутреннюю поверхность трубчатой сваи одновременно, для чего заранее из отдельных тензодатчиков собирают ленточные групповые модули (рис.2).

Групповые тензодатчики монтируют на бумажной или изоляционной ленте шириной 6-10 мм, располагая их один за другим с заданным шагом или в шахматном порядке с шагом, равным базе тензодатчика, как показано на рис.2. На ленте вырезают поперечные щели 1 длиной, равной ширине тензодатчика 2. Тензодатчики накладывают на ленту так, что они образуют цепочку датчиков, расположенных в шахматном порядке. Выводные концы тензодатчиков фиксируют на ленте так, что конец тензорешетки 3 первого датчика служит началом тензорешетки второго датчика и т.д. Затем к выводным концам тензодатчиков припаивают провода 4, которые соединяют датчики с автоматическим измерителем деформаций типа АИД-1М (АИ-1).

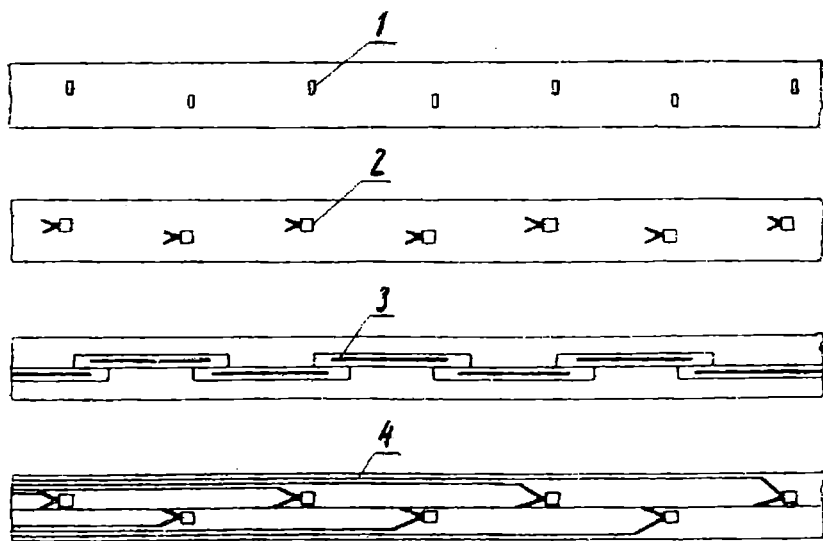


Рис. 2. Изготовление ленточных групповых модулей

Чтобы избежать обрыва концов в местах их припоя к соединительным проводам, после монтажа поверх этих проводов накладывают вторую изоляционную ленту, в результате чего соединительные провода оказываются зажатыми между двумя изоляционными лентами, а решетки тензодатчиков надежно закреплены на рабочей стороне ленты.

В качестве проводников обычно применяют медную никелированную проволоку К-62 сечением $0,1-0,2 \text{ мм}^2$, изолированную термостойким эмаль-лаком (ТУ 017 – 362), или медные провода, изолированные обычными лаками.

Специальные исследования на тарировочной балке равного сопротивления двух типов лент при шаге, равном базе тензодатчика, в одной из которых тензодатчики располагались один за другим в цепочку с наклейкой их в пределах тензорешетки, а в другой – при шахматном расположении и приклейке тензодатчиков по всей поверхности показало, что в первом случае происходит снижение тензочувствительности датчиков и разброс их показаний. В то же время, деформации, зафиксированные тензодатчиками при приклейке их по всей поверхности, соответствуют теоретическим значениям.

До наклейки тензодатчиков внутреннюю поверхность модели трубчатой сваи подготавливают, механически очищая от грязи, ржавчины и пыли. Места, предназначенные для наклейки тензодатчиков, зачищают шкуркой КЗ-205, затем поверхность тщательно промывают ацетоном и этиловым спиртом. После сушки поверхности в течение

30 мин при температуре 30-35° С приступают к наклейке тензодатчиков, которую осуществляют в следующем порядке.

Непрерывную ленту 2, состоящую из n-го числа тензодатчиков, накладывают на поверхность пуансона 1 и местами при помощи ниток 3 привязывают к нему (рис.3). Если групповые тензодатчики защищены изоляционной лентой, то взамен ниток применяют тонкие полоски бумаги 4. В опытах автора [3] в исследуемые стержни одновременно наклеивали до 80 тензодатчиков сопротивления с базой 20 мм, смонтированных на одной ленте.

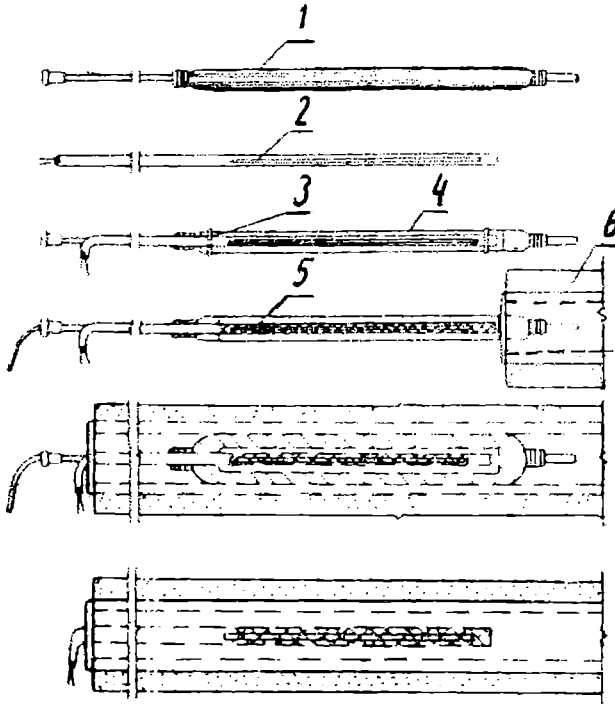


Рис.3. Наклейка ленты с тензодатчиками внутри трубчатого стержня

Для беспрепятственного извлечения пуансона из трубы между резиновой трубкой и лентой, на которой смонтированы тензодатчики, прокладывают глянцевую бумагу 4. Затем один конец пуансона вставляют в трубчатый элемент 6, а другой присоединяют к насосу или баллону со сжатым воздухом.

После проверки, разметки и ориентации тензодатчиков сопротивлений при помощи кисти на поверхность групповых тензодатчиков тщательно наносят клей 5 (БФ-2). После сушки на воздухе (в чистом обеспыленном помещении) поверхность тензодатчиков

покрывают вторым слоем клея БФ-2. Общая толщина клеевого слоя составляет 40-50 мк.

Пуансон с лентой тензодатчиков осторожно вставляют в полость трубчатого элемента, открывают клапан газового баллона и сжатый воздух поступает внутрь пуансона, величину давления в котором контролируют с помощью манометра и держат постоянным в течение 2-3 ч. При этом через упругую резиновую трубку пуансона давление равномерно передается на ленту с датчиками, создавая благоприятные условия для приклеивания их на внутренней поверхности полого трубчатого стержня. Затем в течение 2-3 мин давление воздуха снижают до атмосферного, после чего, осторожно поворачивая, пуансон вынимают из полого элемента.

В течение всего процесса наклейки тензодатчиков их исправность контролируют при помощи автоматического измерителя деформаций.

Контроль тензодатчиков осуществляют при:

а) подборе их по сопротивлению в комплекты. Разброс сопротивлений одного комплекта тензодатчиков не должен превышать 0,2 ом. Подбор производят посредством моста постоянного тока или прибором АИД-1М;

б) проверке исправности тензодатчиков после их монтажа на ленте;

в) проверке исправности групповых тензодатчиков непосредственно перед введением их внутрь трубчатого элемента;

г) помещении ленты во внутрь модели трубчатой сваи и во время подачи сжатого воздуха, т.е. в процессе приклеивания.

Многостадийный контроль исправности тензодатчиков даст возможность после каждой проверки устранять обнаруженные дефекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авт. свид. №164106. СССР. Способ изготовления испытательных полых арматурных стержней / В.Н.Гусаков, К.О.Карамян (СССР). - Бюл. изобр. № 12, 1964.
2. Гусаков В.Н., Карамян К.О., Фортученко Ю.А. Измерение деформаций внутренних поверхностей полых деталей большой длины // Измерительная техника: Научно-техн. журнал комитета стандартов, мер и измерит. приборов при СМ СССР. - М., 1966. - № 9. - С.84-85.
3. Гусаков В.Н., Фортученко Ю.А. Деформированное состояние продольной арматуры в конструкциях из тяжелого силикатного бетона в зоне действия поперечной силы // Сб.тр. ВНИИСТРОМ. - 1966. - № 38. - С. 217-253.

УДК 656.61.07

РІВНЯННЯ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ КОЕФІЦІЄНТІВ ВНУТРІШНЬОГО МАСОПЕРЕНОСУ ДЕРЕВИННО- ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

В.О. Загоруйко, О.А. Вассерман, О.Г. Слинько

Гігроскопічні матеріали — це складні гетерогенні системи, які знаходяться в гігротермічній рівновазі з оточуючим середовищем. При наявності градієнтів температури та вологості в таких матеріалах виникають потоки теплоти і вологи, що впливає на процеси їх транспортування, зберігання та переробки. Зміна температури і вологовмісту гігроскопічних матеріалів, тобто встановлення гігротермічної рівноваги між матеріалами і оточуючим середовищем, відбувається повільно, проте це необхідно враховувати при перевезенні і тривалому зберіганні таких вантажів.

Параметри оточуючого середовища при морських перевезеннях вантажів змінюються як в сезонному і добовому часі, так і в залежності від напрямку руху судна (північ–південь). Враховуючи тривалість перевезення, для зберігання якості гігроскопічних вантажів слід враховувати можливість протікання процесів тепло- і масопереносу в них, наслідки цих процесів і забезпечувати оптимальні режими роботи систем технічного кондиціонування трюмів. Це необхідно для підтримки кондиційної гігротермічної рівноваги між вантажем і оточуючим середовищем, що забезпечить збереження якості вантажу.

До цього часу визначення гігротермічного рівноважного стану вантажів виконується за допомогою графічних залежностей (діаграм H, d) або на підставі табличних даних. Це стримує впровадження в практику сучасних систем автоматизованого проектування та управління технологічними процесами (САПР і АСУТП). Тільки аналітична форма подання даних про гігроскопічні властивості матеріалів, зокрема про коефіцієнти внутрішнього масопереносу, дасть поштовх розвитку сучасних технологій перевезень гігроскопічних вантажів.

Інтенсивність процесів тепло- і масопереносу всередині матеріалу та між матеріалом і оточуючим середовищем залежить від коефіцієнтів внутрішнього масопереносу, які в свою чергу залежать від вологовмісту, температури та структури матеріалу. Волога в капілярах матеріалів знаходиться у вигляді двох фаз (рідини і пари), а її розподіл між фазами та вклад кожної з них в загальний потік вологи залежать від вказаних вище факторів і не можуть бути визначені експериментально. Однак використання методів нерівноважної термодинаміки дозволило на базі потенціальної теорії сорбції та капілярної конденсації [1, 2] розрахувати коефіцієнти внутрішнього масопереносу деяких гігроскопічних

матеріалів, включаючи деревинно-волокнисті [3]. Такі розрахунки виконуються на підставі складних теоретичних положень і залежностей, що ускладнює їх практичне використання в інженерних розрахунках процесів тепломасообміну.

Масоперенос в деревині в значній мірі визначається її структурою і ступеню відкритості макропор порожнин клітин, міжклітинних мембран, серцевинних промінів, смоляних ходів і провідних судин. При розрахунку даних для деревинно-волокнистих матеріалів [3] для врахування звилістості дифузійних каналів і наявності тупикових зон в рівняння дифузії був внесений коригуючий множник ξ . Його величина залежить від виду деревини і напрямку потоку вологи (радіальний, тангенціальний або осьовий) і може змінюватись у межах від 0 до 1. Якщо $\xi = 0$ (випадок повністю закритих макропорожнин), то перенесення вологи здійснюється тільки по оболонкам клітин шляхом капілярної течії рідинної фази та ефузії пари. Якщо $\xi > 0$, то до загального потоку приєднується дифузійний потік пари по складній системі макропор.

Значення ξ може бути визначене із співвідношення

$$\Pi_{Fmacro} = \xi \cdot \Pi_{Vmacro}, \quad (1)$$

де $\Pi_{Fmacro} = F_{e,n}/F_{z,m}$ – відносна поверхнева пористість, тобто відношення ефективної площі пор $F_{e,n}$ до геометричної площі поверхні масопереносу $F_{z,m}$;

Π_{Vmacro} – відносний об'єм макропор.

Значення Π_{Vmacro} може бути розраховано за рівнянням

$$\Pi_{Vmacro} = 1 - \frac{\rho_0}{(1 + ni)\rho_T}, \quad (2)$$

де ρ_0 і ρ_T – густина сухої маси та скелету;

n – коефіцієнт об'ємного набрякання.

В свою чергу коефіцієнт n визначається рівнянням

$$n = k_0 - (1 - k_0) \cdot u. \quad (3)$$

В рівнянні (3) k_0 – коефіцієнт усихання

$$k_0 = \frac{\Delta\rho}{u \cdot \rho} = 1 - \frac{\rho - \rho_0}{u \cdot \rho}, \quad (4)$$

де ρ – густина вологої маси;

u – вологість деревини.

Отже, як вказано в [3], для визначення ξ конкретного деревинно-волокнистого матеріалу необхідне подальше теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження коефіцієнта об'ємного набрякання матеріалу та ефективної площі поверхні макропор.

Метою даної роботи було отримання рівнянь для розрахунків коефіцієнтів внутрішнього масопереносу деревинно-волокнистих матеріалів в залежності від температури та відносної вологості повітря. При складанні рівнянь ми дотримувались вимог, щоб вони описували опорні дані в границях їх точності, мали достатньо просту форму, були зручні для інженерних розрахунків і для використання в САПР і АСУТП. Досліджувався процес сорбції, який часто зустрічається при транспортуванні та зберіганні вантажу, підвищує його вологість і може привести не тільки до часткового зниження якості, але навіть до втрати вантажу.

Для коефіцієнтів масопровідності та дифузії використовувались опорні дані, отримані в роботі [3] на підставі потенціальної теорії сорбції та капілярної конденсації за допомогою рівняння гігроскопічного стану вологої деревини. Значення коефіцієнтів масопровідності деревини $\lambda_{m\varphi}$, кг/(м·с) та дифузії вологи в деревині a_m , м²/с при потенціалах переносу φ і T наведені в [3] для інтервалів температури від 0 до 60 °С та відносної вологості повітря від 20 до 100 % при п'яти значеннях ξ (від 0 до 1 з кроком 0,25).

Аналіз даних [3] показав, що задача аналітичного відображення залежності коефіцієнтів масопровідності та дифузії від температури і відносної вологості є складною, оскільки їх значення змінюються в дуже широких межах (для масопровідності від 0,0023 до 1,5 [10⁻⁶ кг/м·с] при $\xi = 0$ і від 0,0661 до 3,65 [10⁻⁶ кг/м·с] при $\xi = 1$, а для дифузії від 0,024 до 1,28 [10⁻⁹ м²/с] при $\xi = 0$ і від 0,184 до 31,1 [10⁻⁹ м²/с] при $\xi = 1$). Проте залежність цих коефіцієнтів від ξ є лінійною, що спрощує задачу їх розрахунку при проміжних значеннях ξ .

В результаті пошуку форм аналітичних виразів для функцій $\lambda_{m\varphi}(\varphi, t)$ і $a_m(\varphi, t)$ встановлено, що вони із прийнятною точністю можуть бути представлені у вигляді подвійного розкладання по степенях відносної вологості та температури

$$\lambda_{m\varphi}(a_m) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} \varphi_{II}^i t_{II}^j, \quad (5)$$

де $\varphi_{II} = (\varphi - 20)/100$ — приведена вологість,
 $t_{II} = t/100$ — приведена температура.

Для складання рівняння у формі (5) була розроблена програма визначення його коефіцієнтів b_{ij} за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів з використанням сингулярного розкладання [4]. З метою забезпечення однакової відносної погрішності відображення даних враховувалася їх вага, яка приймалась обернено-пропорційною квадратам значень апроксимуємої функції в кожній опорній точці. Програма дозволяла задавати в рівняннях різні набори степеней вологості і температури.

Спочатку були складені рівняння, які відображають залежність коефіцієнтів масопровідності та дифузії від вологості і температури при значенні ξ , рівному нулю. Коефіцієнти цих рівнянь наведені в табл.1. Рівняння справедливі в області параметрів, яка охоплена даними [3], тобто в інтервалах температури від 0 до 60 °C і відносної вологості від 20 до 100%.

Таблиця 1. Коефіцієнти b_{ij} рівняння у формі (5) для розрахунку масопровідності та дифузії вологи в деревині при значенні $\xi = 0$

i	j	b_{ij}	i	j	b_{ij}	i	j	b_{ij}	i	j	b_{ij}
Для масопровідності $\lambda_{m\phi} \cdot 10^6$, кг/м·с											
0	0	$0,2286 \cdot 10^{-2}$	1	4	$-0,2414 \cdot 10^0$	3	2	$0,3024 \cdot 10^2$	5	1	$0,2064 \cdot 10^2$
	1	$0,9790 \cdot 10^{-2}$		0	$0,2342 \cdot 10^0$		4	$-0,1333 \cdot 10^2$		2	$0,1733 \cdot 10^2$
	2	$0,3431 \cdot 10^{-1}$		2	$-0,7558 \cdot 10^1$		1	$-0,2208 \cdot 10^2$		4	$0,1833 \cdot 10^2$
	4	$0,1471 \cdot 10^0$		4	$0,3639 \cdot 10^1$		2	$-0,4144 \cdot 10^2$		6	$-0,7469 \cdot 10^1$
1	1	$-0,6512 \cdot 10^{-1}$	3	0	$-0,8015 \cdot 10^0$		4	$0,4949 \cdot 10^1$		8	$0,4281 \cdot 10^1$
	2	$0,5015 \cdot 10^0$		1	$0,6463 \cdot 10^1$		5	$0,5042 \cdot 10^1$			
Для дифузії вологи $a_m \cdot 10^9$, м²/с											
0	0	$0,2357 \cdot 10^{-1}$	1	1	$-0,9455 \cdot 10^0$	3	0	$-0,5293 \cdot 10^1$	5	0	$0,1051 \cdot 10^2$
	1	$0,1006 \cdot 10^0$		2	$0,1994 \cdot 10^1$		2	$0,1501 \cdot 10^3$		1	$0,3250 \cdot 10^2$
	2	$0,4232 \cdot 10^0$	2	0	$0,2153 \cdot 10^1$		1	$-0,3551 \cdot 10^2$		2	$0,1010 \cdot 10^3$
	4	$0,1807 \cdot 10^1$		1	$0,8247 \cdot 10^1$		2	$-0,2119 \cdot 10^3$		6	$-0,7632 \cdot 10^1$
				2	$-0,3780 \cdot 10^2$						

Після складання рівнянь для коефіцієнтів масопровідності $\lambda_{m\phi}$ і дифузії a_m при $\xi = 0$ були розраховані різниці $\Delta\lambda_{m\phi}$ і Δa_m між значеннями $\lambda_{m\phi}$ і a_m при $\xi = 1$ і значеннями, розрахованими за цими рівняннями у відповідних точках. Отримані функції $\Delta\lambda_{m\phi}(\phi, t)$ і $\Delta a_m(\phi, t)$ були також апроксимовані рівняннями у формі (5), коефіцієнти яких наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Коефіцієнти b_{ij} рівнянь у формі (5) для розрахунку функцій $\Delta\lambda_{m\phi}(\phi, t)$ і $\Delta a_m(\phi, t)$

i	j	b_{ij}	i	j	b_{ij}	i	j	b_{ij}	i	j	b_{ij}
Для $\Delta\lambda_{m\phi}$											
0	0	$0,6321 \cdot 10^{-1}$	1	4	$-0,1145 \cdot 10^{-3}$	3	2	$0,5278 \cdot 10^{-3}$	5	1	$0,3789 \cdot 10^{-2}$
	1	$0,5321 \cdot 10^0$		0	$0,3458 \cdot 10^{-2}$		4	$-0,6153 \cdot 10^{-3}$		2	$0,2280 \cdot 10^{-3}$
	2	$0,1256 \cdot 10^1$		2	$-0,2104 \cdot 10^{-3}$		1	$-0,6265 \cdot 10^{-2}$		4	$0,5456 \cdot 10^{-3}$
	4	$0,1501 \cdot 10^2$		4	$0,5240 \cdot 10^{-3}$		2	$-0,5706 \cdot 10^{-3}$		6	$-0,4476 \cdot 10^{-1}$
1	1	$-0,1388 \cdot 10^1$	3	0	$-0,5232 \cdot 10^{-1}$		4	$-0,2720 \cdot 10^{-3}$			
	2	$0,3157 \cdot 10^2$		1	$0,2723 \cdot 10^{-2}$		5	$0,8698 \cdot 10^{-1}$			
Для Δa_m											
0	0	$0,6597 \cdot 10^0$	1	2	$-0,3262 \cdot 10^{-2}$	2	4	$-0,1087 \cdot 10^{-4}$	4	2	$0,1019 \cdot 10^{-4}$
	1	$0,4274 \cdot 10^1$		4	$0,2669 \cdot 10^{-3}$	3	0	$-0,8917 \cdot 10^{-1}$	5	0	$0,1825 \cdot 10^{-2}$
	2	$0,2488 \cdot 10^2$	2	0	$0,1831 \cdot 10^1$		2	$-0,9143 \cdot 10^{-3}$		1	$-0,3743 \cdot 10^{-2}$
	4	$0,1177 \cdot 10^3$		1	$-0,3592 \cdot 10^2$		4	$0,7283 \cdot 10^{-3}$		2	$-0,3663 \cdot 10^{-3}$
1	1	$0,1005 \cdot 10^2$	2		$0,2717 \cdot 10^3$	4	1	$0,5656 \cdot 10^{-2}$	6	0	$-0,1220 \cdot 10^2$

Маючи рівняння для функцій $\lambda_{тф}(\varphi, t)$ і $a_m(\varphi, t)$ при $\xi = 0$ і для додаткових функції $\Delta\lambda_{тф}(\varphi, t)$ і $\Delta a_m(\varphi, t)$ при $\xi = 1$ і враховуючи лінійну залежність коефіцієнтів масопровідності та дифузії від коригуючого множника ξ , можна розраховувати значення цих коефіцієнтів при проміжних величинах ξ за адитивними формулами

$$\lambda_{тф}(\xi) = \lambda_{тф}(0) + \xi \Delta\lambda_{тф}, \quad (6)$$

$$a_m(\xi) = a_m(0) + \xi \Delta a_m. \quad (7)$$

Розраховані значення коефіцієнтів масопровідності та дифузії зіставлені з опорними даними [3]. В табл. 3 і 4 наведені середні квадратичні і максимальні відхилення розрахованих значень $\lambda_{тф}$ і a_m від цих даних. Значення середнього квадратичного відхилення на кожній ізотермі розраховувались для 18 точок. В останньому стовпцю наведені середні квадратичні та максимальні відхилення для масивів даних, які включають 126 точок для кожного значення ξ .

З табл.3 видно, що складені рівняння задовільно описують більшість даних [3] про масопровідність. При значеннях ξ від 0,25 до 1,0 максимальні відхилення складають 12 % (на крайній ізотермі 60 °С), тобто вони не набагато більше можливої погрішності опорних даних. Тільки при $\xi = 0$ спостерігається значне зростання відхилень, особливо істотне на ізотермах 50 і 60 °С. Для всього масиву даних [3] (630 точок при п'ятьох значеннях ξ) середнє квадратичне відхилення $\delta\lambda_{сеп}$ дорівнює 4 %. Тільки в 40 точках з 630, тобто приблизно для 6 % точок, відхилення перевищують величину $2\delta\lambda_{сеп}$, причому 19 таких точок відносяться до значення $\xi = 0$.

Таблиця 3. Середні квадратичні (рядок 1) і максимальні (рядок 2) відхилення розрахованих значень коефіцієнта масопровідності від даних [3]

Значення ξ	Значення відхилень, % на ізотермах:							Для 126 точок
	0 °С	10 °С	20 °С	30 °С	40 °С	50 °С	60 °С	
0	1,3	6,3	5,7	4,7	5,2	6,7	8,3	5,8
	-3,3	16,0	14,5	11,5	-16,1	-21,1	-25,4	-25,4
0,25	1,2	3,6	3,6	3,1	3,1	4,3	6,0	3,8
	-2,9	10,0	8,7	-5,9	-9,3	-10,8	-12,2	-12,2
0,5	1,3	2,3	2,8	2,6	2,6	3,9	5,8	3,3
	-2,7	5,9	5,8	-5,6	-4,8	6,5	12,0	12,0
0,75	1,3	1,7	2,5	2,6	2,6	4,0	6,0	3,3
	-2,5	2,9	-5,9	-5,7	-4,2	6,7	12,1	12,1
1,0	1,4	1,7	2,5	2,6	2,7	4,2	6,3	3,4
	-2,8	-3,1	-6,0	-5,7	4,2	6,9	12,1	12,1

Таблиця 4. Середні квадратичні (рядок 1) і максимальні (рядок 2) відхилення розрахованих значень коефіцієнта дифузії від даних [3]

Значення ξ	Значення відхилень, % при температурах:							Для 126 точок
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	
0	1,0	2,6	3,0	2,6	2,1	2,5	4,1	2,7
	1,6	4,1	4,7	-4,7	-3,8	4,6	-9,3	-9,3
0,25	2,4	2,5	2,3	1,9	2,1	3,2	4,5	2,8
	-5,5	-5,0	-4,1	3,6	4,7	-6,6	-9,9	-9,9
0,5	2,9	2,6	2,2	1,9	2,2	3,3	4,4	2,9
	-6,4	-5,7	-4,4	3,7	4,8	-6,8	-10,1	-10,1
0,75	3,1	2,7	2,2	1,9	2,3	3,3	4,5	3,0
	-7,8	-5,9	-4,5	3,7	4,8	-6,9	-10,2	-10,2
1,0	3,2	2,8	2,2	1,9	2,3	3,3	4,5	3,0
	-7,0	-6,1	-4,6	3,7	4,8	-6,9	-10,2	-10,2

З табл.4 видно, що складені рівняння цілком задовільно відображають переважну більшість даних [3] про коефіцієнт дифузії a_m . При всіх значеннях ξ максимальні відхилення не перевищують 10 % (на крайній ізотермі 60 °C), тобто сумірні з можливою погрішністю опорних даних. Для всього масиву даних (630 точок) середнє квадратичне відхилення $\delta a_{\text{сєр}}$ дорівнює 2,9 %. Тільки для 40 точок з 630 відхилення перевищують величину $2\delta a_{\text{сєр}}$, що свідчить про нормальний статистичний розподіл відхилень.

Таким чином, складені рівняння, які мають досить просту поліноміальну форму (5), можуть бути рекомендовані для розрахунків коефіцієнтів масопровідності та дифузії деревини в інтервалах температури від 0 до 60 °C і відносної вологості від 20 до 100 % при всіх можливих значеннях множника ξ .

Експериментальні дані про фазовий потік ε у деревині та про коефіцієнт термовологопровідності деревини δ_ϕ , як і про інші коефіцієнти внутрішнього масопереносу, відсутні. Тому при складанні рівнянь для розрахунку фазового потоку та термовологопровідності використані розрахункові значення ε і δ_ϕ , які отримані в роботі [3] теоретичним шляхом в інтервалах температури від 0 до 60 °C і відносної вологості від 20 до 100 %. Ці дані, як і дані про масопровідність і коефіцієнт дифузії, наведені для п'яти значень множника ξ .

Задача апроксимації даних про фазовий потік ε і термовологопровідність δ_ϕ ускладнена тим, що їх залежність від ξ є нелінійною, до того ж значення цих функцій при $\xi = 0$ і $\phi = 100$ % на всіх ізотермах надзвичайно малі. Тому для аналітичного відображення залежності вказаних функцій від відносної вологості як аргумент була обрана величина $\omega = (100 - \phi)/100$, і ці функції були представлені у вигляді подвійного розкладання по степенях ω і $t_{\text{П}}$

$$\varepsilon(\delta_\varphi) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n c_{ij} \omega^i t^j \quad (8)$$

Обрана форма рівняння для функцій $\varepsilon(\varphi, t)$ і $\delta_\varphi(\varphi, t)$ задовольняє граничній умові ($\varepsilon = 0$ і $\delta_\varphi = 0$ при $t = 0$ °C, $\varphi = 100\%$ і $\xi = 0$). Коефіцієнти рівняння (8) визначено методом найменших квадратів за допомогою ПЕОМ. Оскільки в окремих точках величини ε і δ_φ дуже малі, для забезпечення однакової відносної погрішності апроксимації у всій області параметрів вага даних була прийнята обернено-пропорційальною їх значенням, а не квадратам значень, як приймалося для масопровідності та дифузії.

Коефіцієнти рівняння (8) визначалися незалежно для кожного з п'яти значень ξ , для яких в роботі [3] є табличні дані. Значення цих коефіцієнтів наведені в табл. 5 для фазового потоку і в табл. 6 для термовологопровідності. Отримані рівняння справедливі в інтервалах температури від 0 до 60 °C і відносної вологості від 20 до 100 %.

Таблиця 5. Коефіцієнти c_{ij} рівняння (8) для розрахунку фазового потоку

ξ	i	j	c_{ij}	i	j	c_{ij}	i	j	c_{ij}	i	j	c_{ij}
0	0	0	0	1	1	$0,1008 \cdot 10^0$	2	3	$0,4464 \cdot 10^1$	4	2	$0,7003 \cdot 10^1$
		1	$0,1692 \cdot 10^{-2}$		2	$0,7000 \cdot 10^0$		3	$-0,1222 \cdot 10^2$		6	$0,2073 \cdot 10^1$
		2	$0,6862 \cdot 10^{-2}$		4	$-0,9778 \cdot 10^0$		3	$-0,7310 \cdot 10^1$		1	$-0,1228 \cdot 10^2$
		4	$-0,3961 \cdot 10^{-2}$	2	0	$0,4239 \cdot 10^0$	4	0	$-0,8246 \cdot 10^0$		2	$-0,1564 \cdot 10^2$
		1	$0,5828 \cdot 10^{-1}$		1	$0,3507 \cdot 10^1$		1	$0,2100 \cdot 10^2$			
0,25	0	0	$0,7832 \cdot 10^{-1}$	1	1	$0,6493 \cdot 10^1$	2	3	$0,1044 \cdot 10^2$	4	2	$0,1793 \cdot 10^1$
		1	$0,1921 \cdot 10^0$		2	$-0,4556 \cdot 10^1$		3	$0,4706 \cdot 10^1$		6	$0,2255 \cdot 10^1$
		2	$0,5092 \cdot 10^0$		4	$0,2809 \cdot 10^1$		3	$-0,1666 \cdot 10^2$		1	$-0,1779 \cdot 10^2$
		4	$-0,9051 \cdot 10^0$	2	0	$0,1707 \cdot 10^0$	4	0	$-0,2172 \cdot 10^1$		2	$0,1189 \cdot 10^2$
		1	$0,1339 \cdot 10^1$		1	$-0,1462 \cdot 10^2$		1	$0,1521 \cdot 10^2$			
0,50	0	0	$0,1456 \cdot 10^0$	1	1	$0,6893 \cdot 10^1$	2	3	$0,1483 \cdot 10^2$	4	2	$0,4852 \cdot 10^1$
		1	$0,4143 \cdot 10^0$		2	$-0,4581 \cdot 10^1$		3	$0,5318 \cdot 10^2$		6	$0,3731 \cdot 10^0$
		2	$0,4224 \cdot 10^0$		4	$0,1881 \cdot 10^1$		3	$-0,1959 \cdot 10^2$		1	$0,2019 \cdot 10^1$
		4	$-0,1162 \cdot 10^1$	2	0	$-0,1894 \cdot 10^1$	4	0	$0,4342 \cdot 10^0$		2	$0,5566 \cdot 10^1$
		1	$0,2211 \cdot 10^1$		1	$-0,3046 \cdot 10^2$		1	$-0,3458 \cdot 10^2$			
0,75	0	0	$0,2051 \cdot 10^0$	1	1	$0,5112 \cdot 10^1$	2	3	$0,1220 \cdot 10^2$	4	2	$0,3638 \cdot 10^1$
		1	$0,6266 \cdot 10^0$		2	$-0,3014 \cdot 10^1$		3	$0,6414 \cdot 10^2$		6	$-0,1417 \cdot 10^1$
		2	$0,2438 \cdot 10^{-1}$		4	$0,2783 \cdot 10^0$		3	$-0,1413 \cdot 10^2$		1	$0,1159 \cdot 10^2$
		4	$-0,6715 \cdot 10^0$	2	0	$-0,3396 \cdot 10^1$	4	0	$0,2840 \cdot 10^1$		2	$0,2300 \cdot 10^1$
		1	$0,2697 \cdot 10^1$		1	$-0,3026 \cdot 10^2$		1	$-0,5159 \cdot 10^2$			
1,0	0	0	$0,2579 \cdot 10^0$	1	1	$0,3919 \cdot 10^1$	2	3	$0,1724 \cdot 10^1$	4	2	$0,6080 \cdot 10^1$
		1	$0,7457 \cdot 10^0$		2	$-0,1038 \cdot 10^1$		3	$0,7289 \cdot 10^2$		6	$-0,2669 \cdot 10^1$
		2	$-0,5529 \cdot 10^0$		4	$-0,1845 \cdot 10^1$		3	$-0,7915 \cdot 10^0$		1	$0,2116 \cdot 10^2$
		4	$0,1033 \cdot 10^1$	2	0	$-0,4333 \cdot 10^1$	4	0	$0,4492 \cdot 10^1$		2	$-0,5821 \cdot 10^1$
		1	$0,2946 \cdot 10^1$		1	$-0,2989 \cdot 10^2$		1	$-0,6712 \cdot 10^2$			

Таблиця 6. Коефіцієнти c_{ij} рівняння (8) для розрахунку термовологопровідності ($\delta_{\varphi} \cdot 10^3, K^{-1}$)

ξ	i	j	c_{ij}	i	j	c_{ij}	i	j	c_{ij}	i	j	c_{ij}
0	0	0	0	1	1	$0,8264 \cdot 10^1$	2	3	$-0,5143 \cdot 10^3$	4	1	$0,2265 \cdot 10^4$
		1	$0,1154 \cdot 10^0$		2	$0,3274 \cdot 10^1$		3	$-0,1440 \cdot 10^4$		2	$-0,3677 \cdot 10^4$
		2	$0,3592 \cdot 10^0$		4	$0,3596 \cdot 10^2$		2	$0,1831 \cdot 10^4$		6	$0,5246 \cdot 10^2$
		4	$-0,5565 \cdot 10^0$	2	0	$0,1965 \cdot 10^2$		3	$0,5792 \cdot 10^3$		1	$-0,1377 \cdot 10^4$
		1	$0,7792 \cdot 10^0$		1	$0,2684 \cdot 10^3$		4	$-0,4762 \cdot 10^2$		2	$0,2152 \cdot 10^4$
0,25	0	0	$0,5478 \cdot 10^1$	1	1	$0,3184 \cdot 10^3$	2	3	$-0,3933 \cdot 10^3$	4	1	$0,1997 \cdot 10^4$
		1	$0,1272 \cdot 10^2$		2	$-0,3294 \cdot 10^3$		3	$-0,3727 \cdot 10^3$		2	$-0,5957 \cdot 10^4$
		2	$-0,2683 \cdot 10^1$		4	$0,1105 \cdot 10^3$		2	$0,3863 \cdot 10^4$		6	$0,2993 \cdot 10^2$
		4	$0,3431 \cdot 10^1$	2	0	$-0,1069 \cdot 10^3$		3	$0,4011 \cdot 10^3$		1	$-0,1276 \cdot 10^4$
		1	$0,9086 \cdot 10^2$		1	$-0,8861 \cdot 10^3$		4	$-0,1019 \cdot 10^2$		2	$0,2764 \cdot 10^4$
0,50	0	0	$0,1032 \cdot 10^2$	1	1	$0,2270 \cdot 10^3$	2	3	$0,2787 \cdot 10^3$	4	1	$-0,1452 \cdot 10^4$
		1	$0,2616 \cdot 10^2$		2	$-0,2313 \cdot 10^3$		3	$0,2473 \cdot 10^4$		2	$-0,3206 \cdot 10^4$
		2	$-0,2185 \cdot 10^2$		4	$0,4735 \cdot 10^2$		2	$0,2220 \cdot 10^4$		6	$-0,8717 \cdot 10^2$
		4	$0,5493 \cdot 10^1$	2	0	$-0,2487 \cdot 10^3$		3	$-0,4558 \cdot 10^3$		1	$0,1011 \cdot 10^3$
		1	$0,1409 \cdot 10^3$		1	$-0,1434 \cdot 10^4$		4	$0,1775 \cdot 10^3$		2	$0,1554 \cdot 10^4$
0,75	0	0	$0,1466 \cdot 10^2$	1	1	$0,9795 \cdot 10^2$	2	3	$0,4016 \cdot 10^3$	4	1	$-0,3358 \cdot 10^4$
		1	$0,3649 \cdot 10^2$		2	$-0,5088 \cdot 10^2$		3	$0,3928 \cdot 10^4$		2	$-0,1869 \cdot 10^4$
		2	$-0,4478 \cdot 10^2$		4	$-0,7835 \cdot 10^2$		2	$0,1090 \cdot 10^4$		6	$-0,1686 \cdot 10^3$
		4	$0,1825 \cdot 10^2$	2	0	$-0,3285 \cdot 10^3$		3	$-0,4124 \cdot 10^3$		1	$0,8660 \cdot 10^3$
		1	$0,1628 \cdot 10^3$		1	$-0,1541 \cdot 10^4$		4	$0,3010 \cdot 10^3$		2	$0,1084 \cdot 10^4$
1,0	0	0	$0,1852 \cdot 10^2$	1	1	$-0,7604 \cdot 10^1$	2	3	$0,7356 \cdot 10^3$	4	1	$-0,4504 \cdot 10^4$
		1	$0,4341 \cdot 10^2$		2	$0,1163 \cdot 10^3$		3	$0,4724 \cdot 10^4$		2	$-0,2701 \cdot 10^3$
		2	$-0,6654 \cdot 10^2$		4	$-0,2875 \cdot 10^3$		2	$-0,2156 \cdot 10^3$		6	$-0,2161 \cdot 10^3$
		4	$0,4048 \cdot 10^2$	2	0	$-0,3687 \cdot 10^3$		3	$-0,5181 \cdot 10^3$		1	$0,1343 \cdot 10^4$
		1	$0,1700 \cdot 10^3$		1	$-0,1513 \cdot 10^4$		4	$0,3709 \cdot 10^3$		2	$0,5150 \cdot 10^3$

За допомогою складених рівнянь були розраховані значення фазового потоку і термовологопровідності при відповідних величинах коефіцієнта ξ . Розраховані значення ϵ і δ_{φ} зіставлені з даними [3]. У табл. 7 і 8 наведені середні квадратичні і максимальні відхилення розрахованих значень ϵ і δ_{φ} від цих даних (для 18 точок на кожній ізотермі). В останньому стовпцю наведені середні квадратичні та максимальні відхилення для повних масивів даних.

З табл. 7 видно, що складені рівняння відображають переважну більшість даних [3] про фазовий потік з погрішністю, яка не перевищує імовірну погрішність цих даних. При значеннях ξ 0,25; 0,5 і 0,75, відхилення знаходяться у межах від мінус 5,4 до плюс 4,4 %, і тільки при $\xi = 0$ на ізотермах 20 і 30 °C вони перевищують значення мінус 10 %. Рівняння для термовологопровідності також задовільно відображають більшість даних [3] (табл. 8). Тільки при $\xi = 0$ на ізотермах 0 і 10 °C максимальні відхилення трохи перевищують мінус 10 %.

Таблиця 7. Середні квадратичні (рядок 1) і максимальні (рядок 2) відхилення розрахованих значень фазового потоку від даних [3]

Значення ξ	Значення відхилень, % на ізотермах:							Для 126 точок
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	
0	2,6	3,8	4,3	4,1	3,5	2,8	3,8	3,6
	-6,4	-9,3	-11,5	-10,9	-8,6	-5,8	8,4	-11,5
0,25	1,6	1,8	1,5	1,3	1,1	1,2	2,4	1,6
	2,4	-4,0	2,6	-2,5	2,3	2,0	4,4	4,4
0,5	1,0	1,1	1,0	0,6	0,6	0,9	2,1	1,1
	1,8	2,0	-1,8	1,4	1,3	2,0	-5,4	-5,4
0,75	0,4	0,8	0,7	0,4	0,5	0,9	1,4	0,8
	-0,8	1,6	-1,4	1,0	1,2	2,0	-3,4	-3,4
1,0	0,3	0,6	1,1	1,6	1,4	1,4	4,7	2,1
	0,5	-1,5	-2,6	-3,8	-3,5	3,4	8,6	8,6

Таблиця 8. Середні квадратичні (рядок 1) і максимальні (рядок 2) відхилення розрахованих значень термовологопровідності від даних [3]

Значення ξ	Значення відхилень, % на ізотермах:							Для 126 точок
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	
0	4,9	4,7	4,1	3,6	3,7	3,8	4,2	4,2
	-11,0	-10,8	-9,3	-8,1	-8,0	-8,3	-9,8	-11,0
0,25	1,9	1,9	1,7	1,9	2,4	1,9	3,1	2,2
	3,6	4,7	-5,4	-6,1	-8,1	-6,3	9,9	9,9
0,5	0,7	0,9	0,6	0,8	1,0	1,1	2,1	1,1
	1,7	2,5	-1,5	-1,8	-2,0	-3,3	-4,6	-4,6
0,75	0,6	1,3	1,1	0,9	1,3	2,1	3,2	1,7
	-0,9	3,9	2,9	-1,7	4,0	6,6	7,4	7,4
1,0	1,0	1,6	1,3	0,9	1,4	2,6	3,8	2,0
	-1,9	5,4	4,3	2,0	2,7	7,2	-9,8	-9,8

Отже, складені рівняння придатні для розрахунку фазового потоку і термовологопровідності при п'ятьох значеннях ξ , вказаних у таблицях 5 і 6. Значення цих властивостей при проміжних величинах ξ можна визначати лінійною інтерполяцією на підставі даних, розрахованих за рівняннями, справедливими для найближчих ξ . В інтервалі ξ від 0,25 до 1,0 при всіх значеннях температури і відносної вологості погрішність при лінійній інтерполяції буде незначною, і тільки в інтервалі ξ від 0 до 0,25 вона може виявитись більш істотною у зв'язку з суттєвою зміною значень ϵ і δ_{ϕ} .

Табличні дані [3] про коефіцієнти масопереносу розраховані для деревини сосни з параметрами: густина $\rho_0 = 560$ кг сухої маси /м³; стандартна густина при вологості $U = 15$ % $\rho_{15} = 600$ кг/м³; максимальний гігроскопічний вологовміст при $t = 0$ °C і $\phi = 100$ % $U_{0s} = 0,347$ кг вологи /кг сухої маси.

Переносні властивості деревини a_m , ϵ і δ_ϕ , наведені в таблицях [3], при значенні $\xi = 0$ залежать лише від вологовмісту U та температури t і не залежать від виду деревини, тобто справедливі для всіх деревинно-волоконистих матеріалів, які мають єдине однопараметричне рівняння стану $W = f(H_0)$.

В той же час коефіцієнт масопровідності $\lambda_{m\phi}$ залежить від виду деревини і для будь-якого деревинно-волоконистого матеріалу розраховується за співвідношенням

$$\lambda_{m\phi} = \lambda_{m\phi}^* \frac{\rho_0 \cdot U_{OS}}{\rho_0^* \cdot U_{OS}^*}, \quad (9)$$

де $\lambda_{m\phi}^*$ — значення коефіцієнта масопровідності, розраховане за рівнянням (5);

ρ_0 і U_{OS} — густина і максимальний вологовміст досліджуємої деревини;

ρ_0^* і U_{OS}^* — густина і максимальний вологовміст сосни при 0°C і $\phi = 100\%$.

Відносний коефіцієнт термовологопровідності δ_u при змінних T і U залежить тільки від максимального гігроскопічного вологовмісту U_{OS} і коригується співвідношенням

$$\delta_u = \delta_u^* \frac{U_{OS}}{U_{OS}^*}, \quad (10)$$

Значення δ_u і δ_ϕ пов'язані рівнянням [5]

$$\delta_u = C_{mT} \cdot \delta_\phi - C_{m\phi}, \quad (11)$$

де C_{mT} і $C_{m\phi}$ — ізотермічна та ізопотенціальна масоємності відповідного матеріалу (для деревинно-волоконистих матеріалів вони наведені в [1]).

Значення коефіцієнтів масопереносу, які наведені в таблицях роботи [3], при значеннях $\xi > 0$ точно дійсні для сосни вищевказаних параметрів. Для других порід і видів деревинно-волоконистих матеріалів вони мають тільки приблизне значення. Більш точні значення переносних властивостей конкретної деревини можуть бути розраховані за наступними формулами:

для коефіцієнта масопровідності $\lambda_{m\phi}$:

$$\lambda_{m\phi} = \lambda_{m\phi}^* \frac{\rho_{0S} U_{0S}}{\rho_0 U_0} + \xi \rho_S D \left(1 - \frac{\rho_0 U_{0S}}{\rho_0^* U_{0S}^*} \right), \quad (12)$$

для коефіцієнта дифузії вологи:

$$a_m = a_m^* + \frac{\xi \rho_S D}{C_{mT}} \left(\frac{1}{\rho_0 U_{0S}} - \frac{1}{\rho_0^* U_{0S}^*} \right), \quad (13)$$

для коефіцієнта фазового потоку:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon^* - A}{1 - A}, \quad (14)$$

де

$$A = \frac{\xi \rho_S D}{\lambda_{m\varphi}^*} \left(1 - \frac{\rho_0^* \cdot U_{0S}^*}{\rho_0 \cdot U_{0S}} \right), \quad (15)$$

ρ_S — густина насиченої пари при температурі t ;

D — коефіцієнт взаємної дифузії водяної пари та повітря, який визначається співвідношенням:

$$D = 2,16 \cdot 10^{-5} (T / 273)^{1,8}. \quad (16)$$

Необхідні для розрахунку коефіцієнтів масопереносу будь-якого деревинно-волокнистого матеріалу за вищенаведеними формулами значення густини сухої маси ρ_0 та максимального гігроскопічного вологовмісту U_{0S} наведено у табл. 9. Ця таблиця складена на підставі даних робіт [1,2], які узагальнюють дослідні дані, наведені у ряді довідників.

Таблиця 9. Значення максимального гігроскопічного вологовмісту деревинно-волокнистих матеріалів U_{0S} , кг води / кг сухої маси (при $T = 273,15$ К, $\varphi = 100$ %)

Матеріал	U_{0S}	Матеріал	U_{0S}
1. Деревина густиною 300 кг/м ³	0,2620	4. Торфоплеум-торфоплити густиною 100 кг/м ³	0,4120
400 кг/м ³	0,2775	200 кг/м ³	0,2890
500 кг/м ³	0,3170	300 кг/м ³	0,2733
600 кг/м ³	0,3667	400 кг/м ³	0,2917
700 кг/м ³	0,4450		
2. Силікат-органік густиною 300 кг/м ³	0,1380	5. Фіброліт конструкційний густиною 400 кг/м ³	0,3437
400 кг/м ³	0,1512	500 кг/м ³	0,3930
500 кг/м ³	0,1750		
600 кг/м ³	0,2050		
3. Торф'яні вироби густиною 100 кг/м ³	0,4730	6. Фіброліт теплоізоляційний густиною 200 кг/м ³	0,3250
200 кг/м ³	0,3410	300 кг/м ³	0,3183
300 кг/м ³	0,3317	325 кг/м ³	0,3200
400 кг/м ³	0,3625		
500 кг/м ³	0,4260		

Продовження таблиці 9

Матеріал	U_{os}	Матеріал	U_{os}
7. Пробка густиною 200 кг/м ³ 300 кг/м ³ 400 кг/м ³	0,1435	10. Джут	0,3488
	0,1363	11. Манила	0,2857
	0,1465	12. Сизаль	0,2729
8. Войлок шерстяний густиною 100 кг/м ³ 200 кг/м ³ 300 кг/м ³ 400 кг/м ³	0,3940	13. Льяняні вироби льон натуральний пряжа волокно луб стебел тканина Льяняна треста моченцова моченцова (солома) моченцова (нитки) стланцева	0,2310
	0,2780		0,2645
	0,2620		0,2710
	0,2750		0,3320
9. Бавовна сорт 108Ф египетський американський індійський	0,2065		0,3620
	0,2201		0,1750
	0,2123		0,3700
	0,2319		0,2660
			0,2150
			0,3170

Складені рівняння використано для поповнення банку даних про теплофізичні властивості гігроскопічних матеріалів, що функціонує в Одеському національному морському університеті. Вони можуть бути використані при розрахунках, пов'язаних з проектуванням систем технічного кондиціонування трюмів морських суден та складських приміщень для зберігання вологих вантажів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Загоруйко В.А., Кривошеев Ю.И., Слынько А.Г. *Определение влагосодержания гигроскопичных грузов для их сохранной перевозки: Справочные таблицы / Под ред. В.А. Загоруйко. – М.: Транспорт, 1988. – 496 с.*
2. Загоруйко В.А., Голиков А.А., Слынько А.Г. *Термодинамика и теплофизика влажных материалов / Под ред. В.А. Загоруйко. – Киев: Наукова думка, 1995. – 296 с.*
3. *Дослідження гігроскопічних та теплофізичних властивостей вологих матеріалів//Заключний звіт з НДР, № держ. реєстрації 0198U002681, Одеса, ОНМУ, 2000. – 122 с.*
4. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. *Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 279 с.*
5. Загоруйко В.А., Соколовская А.В. *Теория единого потенциала массопереноса //Докл. АН СССР. – 1986. – 287. - №1. - С.154-158.*

УДК 629.12.06:628.84

ПОДДЕРЖАНИЕ КОМФОРТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНДИЦИОНИРУЕМОГО ВОЗДУХА В СУДОВЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

В. В. Вычужанин

Системы управления (СУ) для судовых установок кондиционирования воздуха предназначены для поддержания температуры и относительной влажности воздуха на выходе из центральных кондиционеров или для изменения их по заданному закону. В летнем режиме работы кондиционера обеспечивается регулирование только температуры воздуха, относительная влажность устанавливается постоянной. В зимнем режиме одновременно поддерживаются температура и влажность приточного воздуха. Для круглогодичного кондиционирования при переменных тепловлажностных нагрузках параметры воздуха в помещениях обеспечиваются в соответствии с санитарными нормами регулированием на выходе из кондиционера, а также вручную, посредством каютных доводочных и смесительных воздухораспределителей.

Согласно действующим нормативным положениям, параметры микроклимата в жилых и служебных помещениях определяются для летнего и зимнего периодов года с учётом районов плавания судна конкретными значениями результирующей температуры (РТ). Составляющие РТ: температура t_n ; относительная влажность φ_k ; скорость движения ω_k воздуха в помещении; средняя радиационная температура t_R окружающих поверхностей. Для выбранного, обоснованного контрольного помещения с вычисленной текущей РТ требуемые параметры кондиционируемого воздуха в помещении на диаграмме I-d могут быть представлены точкой К. Тогда в целях поддержания требуемых параметров воздуха в помещении необходимо осуществлять управление работой исполнительных устройств систем кондиционирования воздуха (СКВ) по отклонению от точки К. Поскольку эта точка задана, то такой способ имеет преимущества перед регулированием по точке, характеризующей параметры подаваемого (приточного) в помещение воздуха. Состояние приточного воздуха должно изменяться при переменных тепловлажностных нагрузках (точка состояния перемещается). Определить его в каждый момент времени, зная расчётные значения $Q_{изб}$ и G_n , можно по следующим уравнениям [1]:

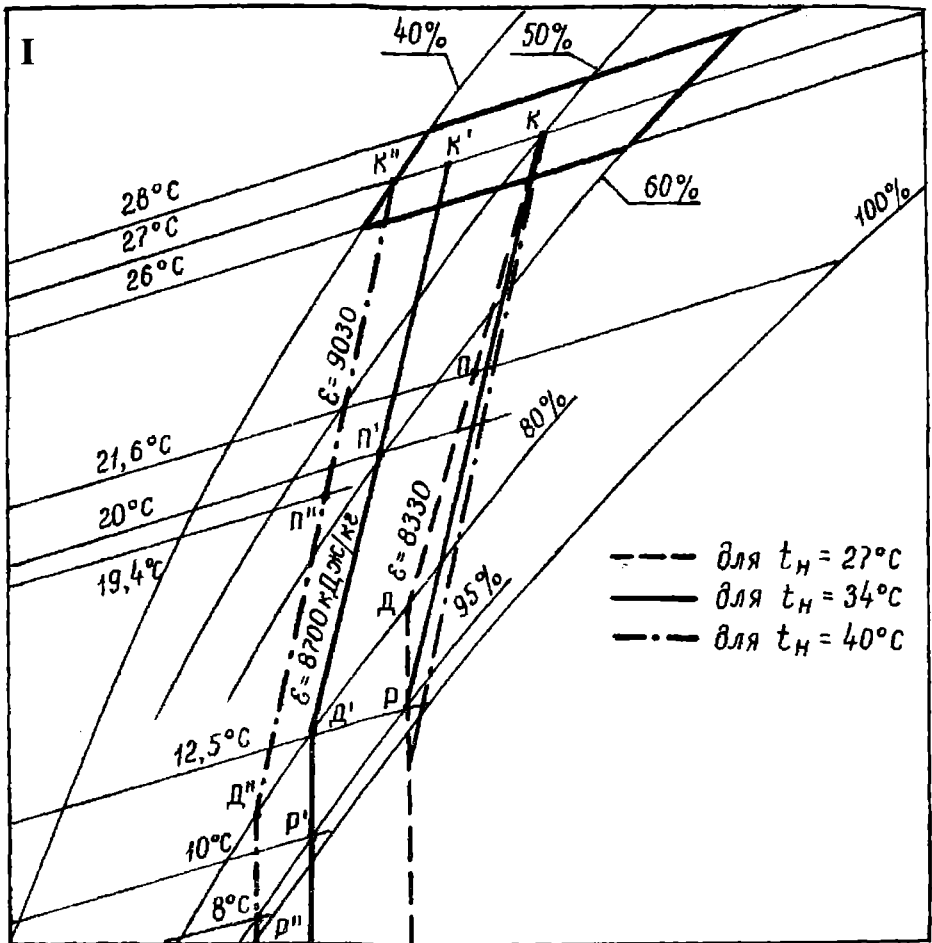
$$Q_{изб} = G_n (I_k - I_n);$$
$$I = 0,009t_M^2 + 0,385t_M + 2,32,$$

где $Q_{\text{изб}}$ – теплоизбытки в помещении;
 $G_{\text{п}}$ – расход воздуха, подаваемого в помещение;
 $I_{\text{к}}$ – энтальпия воздуха помещения;
 $I_{\text{п}}$ – энтальпия приточного воздуха;
 $t_{\text{м}}$ – температура воздуха по мокрому термометру.

На основе расчётов и проведенных исследований [2], разработана СУ СКВ по отклонению от заданной точки К, обеспечивающая поддержание в судовых жилых и служебных помещениях комфортного микроклимата в соответствии с заданными нормами РТ_н. Из результатов, полученных на основе номограммы РТ, следует, что отклонение относительной влажности в судовом помещении на +10% при $\omega_{\text{к}}=\text{const}$, $t_{\text{R}}=\text{const}$ вызывает изменение температуры воздуха на $\pm 1^{\circ}\text{C}$ в летний и на $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ в зимний период времени. Так как в судовых СКВ допускаются предельные колебания температуры $\Delta t \leq \pm 1^{\circ}\text{C}$, то можно принять, что при сохранении постоянной температуры относительная влажность может изменяться в пределах $\Delta \varphi \leq \pm 10\%$, что соответствует условиям комфорта.

В летнем режиме работы СКВ независимо от изменений тепловой нагрузки (ДК, Д' К' и Д'' К'' на рис.1), при обеспечении заданной температуры воздуха в помещениях регулированием холодопроизводительности холодильной установки по сигналу отклонения от точки К, влажность воздуха в помещении находится в зоне комфорта (точки К, К' и К'' на рис.1). В зимнем режиме работы СКВ СУ поддерживает в помещении: заданную температуру воздуха (лучи процессов ДК, Д' К' и Д'' К'' на рис.2) регулированием расхода пара через калорифер; заданную постоянную относительную влажность воздуха в распределительной камере кондиционера (точки Д, Д' и Д'' на рис.2) изменением расхода пара через увлажнитель. При этих условиях относительная влажность воздуха в помещении соответствует комфортным значениям (точки К, К' и К'' на рис.2). Рекомендуемое регулирование необходимо осуществлять при сохранении постоянного расхода подаваемого в помещение, обеспечивая в пределах зоны обитаемости условие $\omega_{\text{к}}=\text{const}$. Обычно в каютном эжекционном доводчике обеспечивается подача воздуха, обработанного в кондиционере и рециркуляционного воздуха помещения в соотношении 1:1.

Приведенные на рис.1 и 2 процессы изменения состояния приточного воздуха для переменных тепловлажностных нагрузок при круглогодичной работе СКВ служат основой для определения алгоритмов функционирования СУ (рис.3).



d

Рис.1. Процессы кондиционирования воздуха на диаграмме I-d при переменных тепловлажностных нагрузках в летнем режиме работы СКВ

Для реализации СУ СКВ по РТ за основу взят восьмиразрядный RISC-микроконтроллер семейства AVR фирмы Atmel AT90S2333 [3] с максимальной тактовой частотой 8 МГц, Flash-памятью 2кБ, ППЗУ-128 кБ, ОЗУ-128 Б. В микроконтроллер также входят:

- универсальный асинхронный последовательный приёмопередатчик (UART);
- АЦП;
- два таймера/счётчика;
- сторожевой таймер (WDT);
- компаратор: интерфейс SPI.

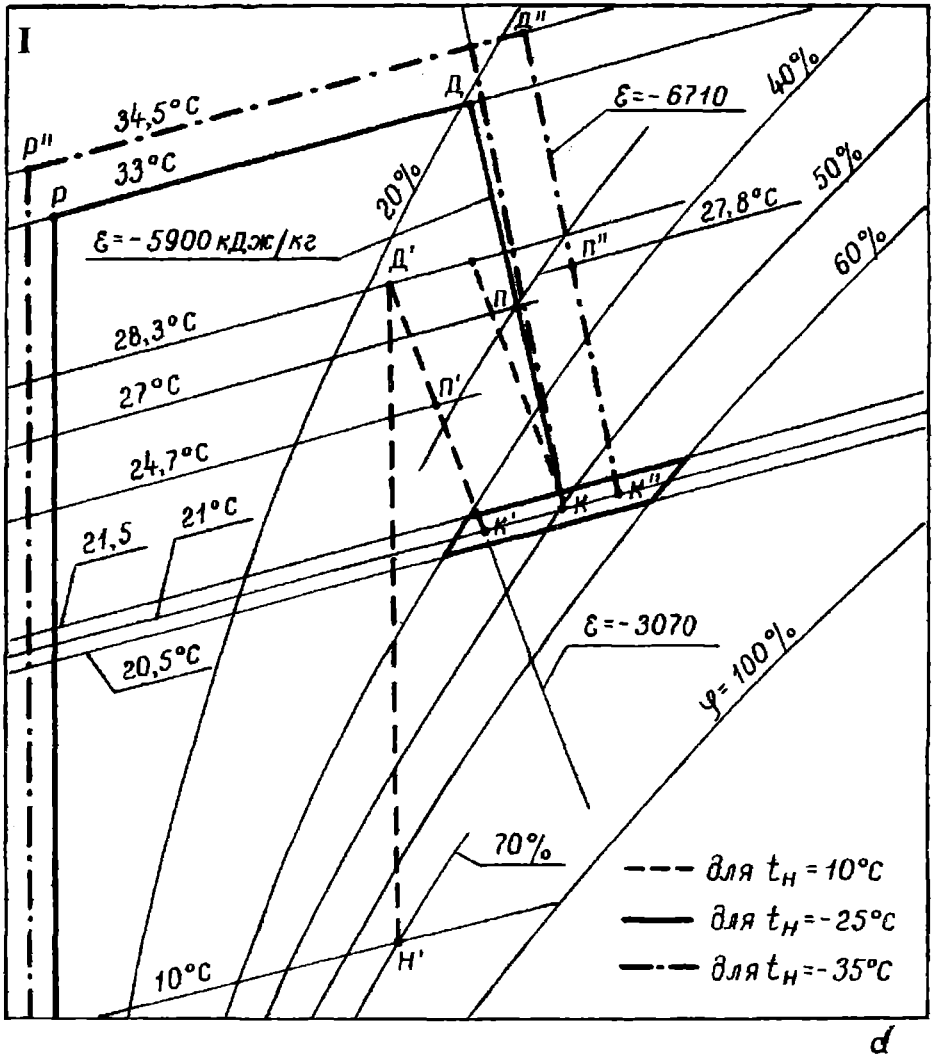


Рис. 2. Процессы кондиционирования воздуха на диаграмме I-d при переменных тепловлажностных нагрузках в зимнем режиме работы СКВ

В ПШЗУ записана рабочая программа управления и регулирования в соответствии с алгоритмом функционирования СКВ, программно вводятся уставки каналов защиты и регулирования.

ОЗУ используется для загрузки в центральный процессор данных, хранения готовых результатов или данных, полученных в процессе работы.

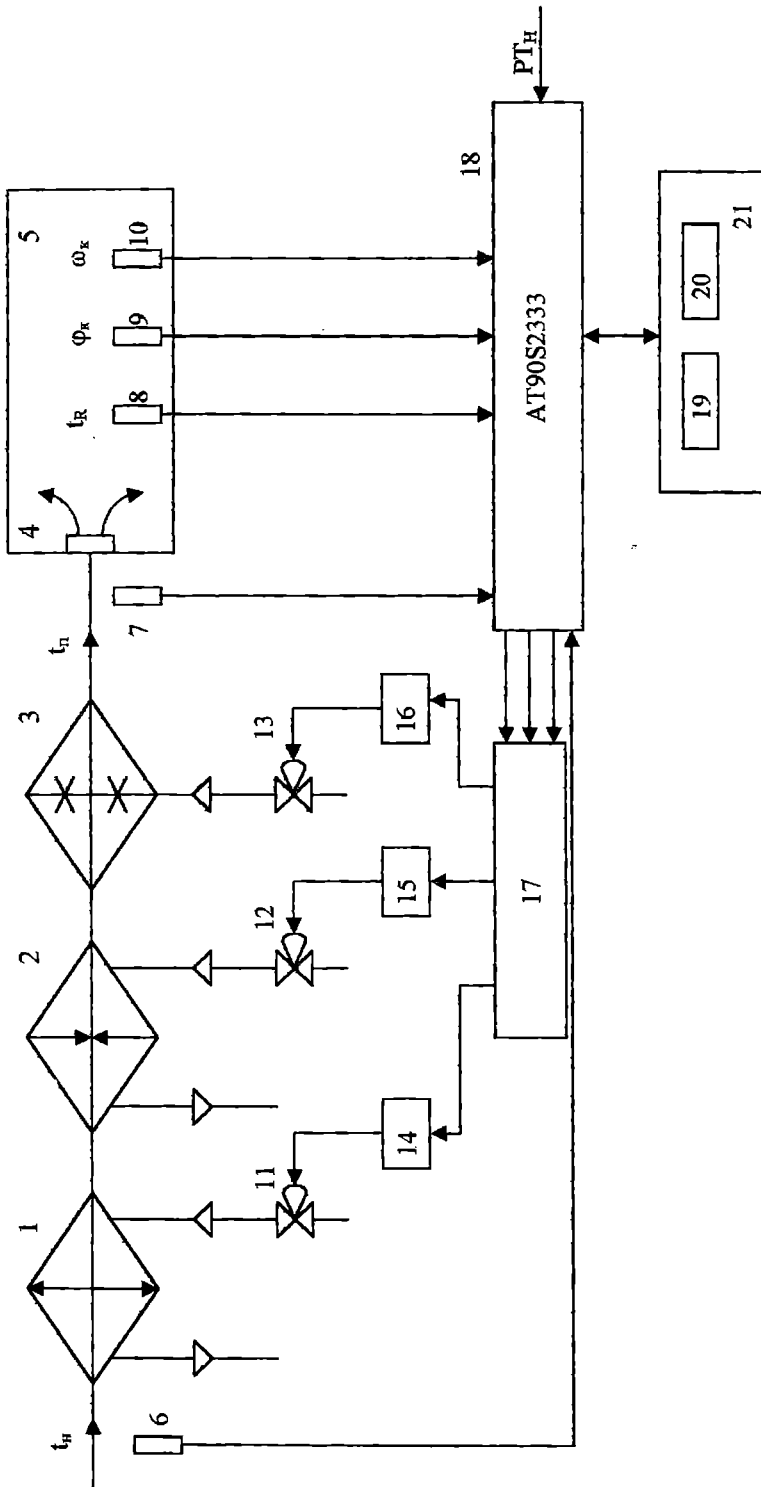


Рис. 3. Схема СУ СКВ на основе микроконтроллера: 1 - воздухоохладитель; 2 - воздухонагреватель; 3 - увлажнитель; 4 - каютный доводчик; 5 - контрольное помещение; 6, 7, 8, 9, 10 - датчики; 11, 12, 13 - исполнительные органы; 14, 15, 16 - исполнительные устройства; 17 - цифровой преобразователь; 18 - клавиатура; 19 - дисплей; 20 - микроконтроллер; 21 - пульт управления

Пульт управления с помощью клавиатуры связан с ОЗУ, ППЗУ СУ. В ячейки клавиатуры заносятся уставки по каналам защиты и регулирования. Пульт также управляет (в ручном или полуавтоматическом режимах) элементами СКВ.

Цифровая и световая индикация, предусмотренная в пульте управления, позволяет визуально определять состояние СКВ (пуск, работа и останов), а также установить значение параметра, в результате изменения которого не обеспечиваются комфортные условия воздушной среды в помещении.

Микроконтроллерная СУ СКВ в соответствии с алгоритмом управления логически обрабатывает по заданной программе входные сигналы, характеризующие состояние СКВ, выполняет временные и счётные операции и коммутацию цепей управления исполнительных устройств. СУ корректирует параметры приточного воздуха по измеренным данным t_p , ϕ_k , ω_k и t_R с учётом нормируемого значения результирующей температуры P_{T_H} . Контроллер СУ вычисляет комфортные параметры воздуха, а также определяет энергетически более выгодный способ воздухообработки в центральном кондиционере СКВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вычужанин В. В., Медзеновский В. Б. Исследование характеристик судового центрального кондиционера // Холодильная техника. – 1984. – № 3. – С. 28–31.
2. Николайчук О. Новые $\times 51$ -совместимые микроконтроллеры фирмы Atmel // Схемотехника. – 2002. – № 6. – С. 42–46.
3. Рымкевич А. А., Халамейзер М. Б. Управление системами кондиционирования воздуха. – М.: Машиностроение, 1977. – 322 с.

УДК 681.3:629.12.004-67

ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

А.В.Шахов

Затраты на обслуживание и ремонт являются одним из важнейших эксплуатационных показателей любой технической системы. В настоящее время используются три основные стратегии обслуживания машин и механизмов:

1. Первая стратегия - обслуживание оборудования после выхода его из строя.

В этом случае машины и оборудование эксплуатируются до выхода их из строя (рис. 1). В основном это касается дешевого вспомогательного оборудования при наличии его резервирования, когда замена оборудования дешевле, чем его ремонт и обслуживание. При использовании такой стратегии часто проводятся дополнительные периодические измерения вибрационного состояния машин, что позволяет снизить время ремонта за счет возможности определения в первом приближении момента выхода механизма из строя и оценки необходимых сменно-запасных частей (см. нижний график рис. 1).

Эксплуатация оборудования до выхода его из строя

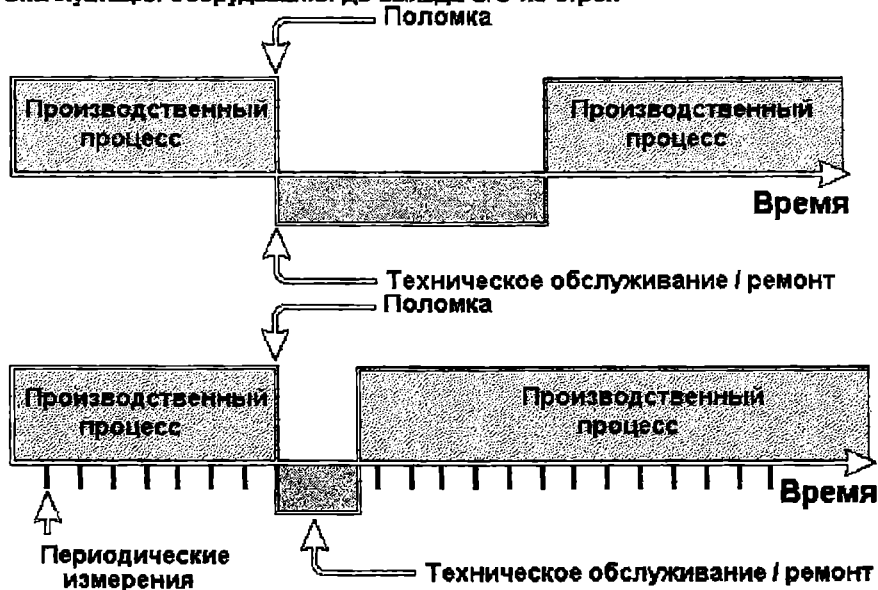


Рис.1. Обслуживание оборудования до выхода его из строя

2. Вторая стратегия - обслуживание оборудования по регламенту.

В этом случае обслуживание производится в соответствии с рекомендациями завода изготовителя через определенные промежутки времени, например, еженедельно или раз в месяц, независимо от технического состояния оборудования. Такой вид обслуживания обычно называется планово-профилактическим. Если периодичность обслуживания определяется методами статистического анализа, то в соответствии с регламентирующими документами период между обслуживаниями обычно составляет время, в течение которого не менее 98% оборудования работает без отказов.

При обслуживании по регламенту по крайней мере не теряется возможность воспользоваться гарантией завода изготовителя. Но оказывается, что не менее 50% из числа всех технических обслуживаний по регламенту выполняются без фактической их необходимости [1]. Кроме того, для многих механизмов обслуживание и ремонт по регламенту не снижают частоту выхода их из строя (см. рис.2).

Обслуживание оборудования по регламенту

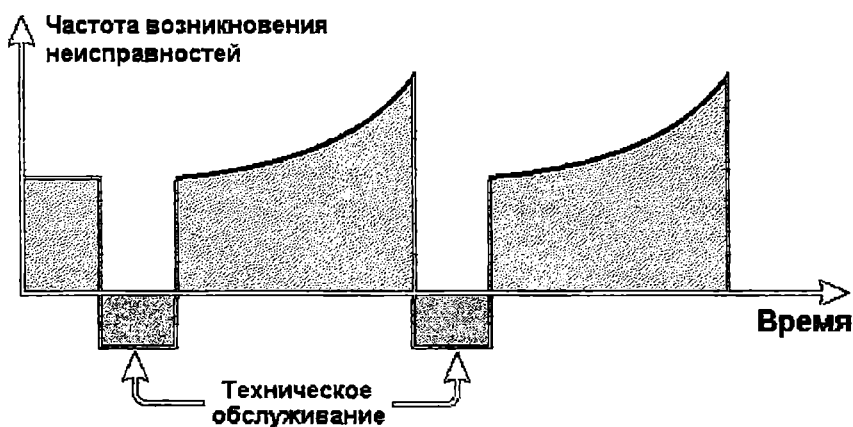


Рис.2. Обслуживание оборудования по регламенту

Более того, надежность работы машин и оборудования после технического обслуживания, если таковое предусматривает разборку механизма или замену деталей, часто снижается, иногда временно, до момента их приработки, а иногда это снижение надежности обусловлено появлением отсутствовавших до обслуживания дефектов монтажа. Исследования показывают, что порядка 70% дефектов вызвано проводимым техническим обслуживанием и ремонтом машин и оборудования [1].

3. Третья стратегия - обслуживание по фактическому техническому состоянию.

При этом виде обслуживания состояние машин и механизмов контролируется периодически (при отсутствии дефектов), или в зависимости от результатов диагноза и прогноза технического состояния (см. рис.3).

Обслуживание оборудования по фактическому состоянию

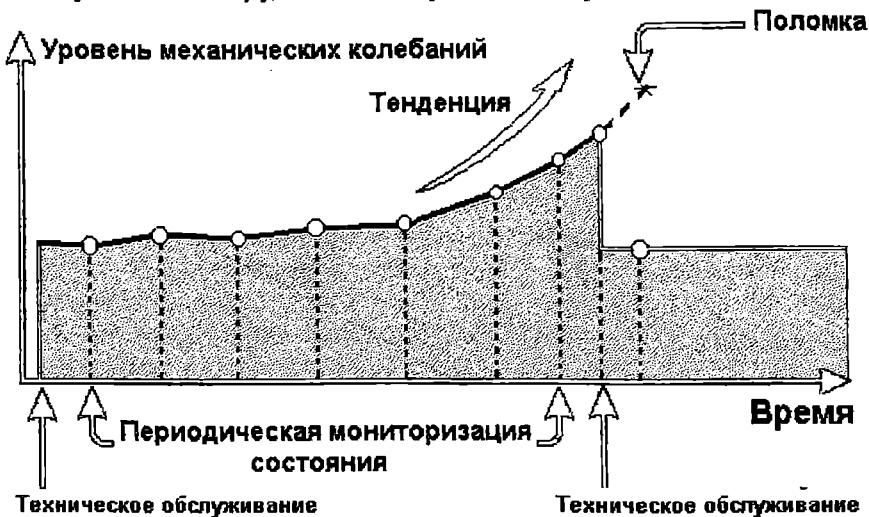


Рис. 3. Обслуживание оборудования по техническому состоянию

Проведение технического обслуживания в этом случае производится только тогда, когда это необходимо в связи с наступлением высокой вероятности отказа оборудования. Тем самым не нарушается работа исправного механизма из-за вмешательства человека.

Сравнительный анализ различных методов обслуживания оборудования роторного типа, по данным Ассоциации Открытых Систем Управления Информацией о Состоянии Машин "MIMOSA", показал, что удельные затраты на техобслуживание в энергетическом секторе США составили в 1998г [2]:

- \$18 на л.с. - при работе оборудования до выхода из строя;
- \$13 на л.с. - при обслуживании по регламенту;
- \$ 9 на л.с. - при обслуживании по техническому состоянию.

Экономический эффект от перехода с обслуживания и ремонта по регламенту на ремонт и обслуживание по фактическому состоянию по данным фирмы "Buel and Kjaer" (Дания) представлен в табл. 1 [2].

Таблица 1. Годовой экономический эффект от перехода с обслуживания и ремонта по регламенту на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию

Химический комбинат (машины с вращающимися элементами)	Снижение числа проводимых техн. обслуживаний с 274 до 14	
Нефтеперерабатывающий комбинат (электродвигатели)	Снижение затрат на обслуживание на 75 %	
Бумажная фабрика	\$ 250,000, что в 10 раз перекрыло расходы на закупку средств для мониторинга механических колебаний	
Атомная электростанция	\$ 3,000,000 за счет снижения затрат на техн. обслуживание	\$ 19,000,000 дополнительное увеличение доходов

Аналогичные результаты получены и в России, например, при переходе на техническое обслуживание по фактическому состоянию: в одном только депо Московка Западно-Сибирской железной дороги получен экономический эффект в 1,5 млрд. неденоминированных руб. (табл. 2) [3].

Следует обратить внимание на то, насколько близки результаты в России и за рубежом, как с точки зрения коэффициента окупаемости (\$25.000 к \$250.000, и 105 млн. руб. к 1,5 млрд. руб.), так и с точки зрения сбережения трудовых ресурсов (снижение количества необходимых обслуживаний с 274 до 14 в Европе и с 216 до 17 в России). При этом происходит снижение количества аварийных ситуаций.

В последнее десятилетие были разработаны несколько эффективных методов обнаружения основных дефектов машин и оборудования по вибрации на этапе их зарождения. Естественно, что они базируются, в основном, на анализе высокочастотной вибрации, для возбуждения которой не нужны большие колебательные силы, но и проявляется она только в месте их действия, быстро затухая при распространении. Такие методы стали использоваться диагностами многих стран для перехода от вибрационного мониторинга к глубокой диагностике. Параллельно развивались методы автоматизации алгоритмов диагностики, что позволило ряду производителей диагностических систем заменить программным обеспечением высококлассных экспертов при решении типовых диагностических задач. Доля таких задач очень высока и превышает девяносто процентов от всех задач, решаемых путем анализа сигналов вибрации. Первые

автоматические системы вибрационной диагностики были разработаны в 1991-1992 годах и постоянно совершенствовались.

Таблица 2. Расчет экономического эффекта от внедрения "Вибродиагностического комплекса для определения технического состояния подшипников качения и зубчатых передач "Прогноз-1" в локомотивном депо Московка Западно-Сибирской ж.д. в 1997 г.

№ п/п	Наименование показателей	Количество
1	Количество локомотивов, прошедших диагностику	216
2	Количество выявленных случаев дефектов подшипников колесно-моторных блоков	17
3	Расходы локомотивного депо за счет заклинивания колесной пары в пути следования, руб.	61,850,000
4	Затраты на выкатку и подкатку колесно-моторного блока (КМБ)	89,689
5	Стоимость разборки и сборки колесно-моторного блока	86,223
6	Количество случаев заклинивания КМБ не прошедших вибродиагностику	8
7	Количество случаев заклинивания КМБ прошедших вибродиагностику	0
8	Единовременные затраты на внедрение комплекса "Прогноз-1", руб.	105,000,000
9	Срок службы комплекса, лет	10
10	Годовая экономия средств за счет сокращения расходов, связанных с заклиниванием КМБ, руб.	1,550,647,800
11	Фактический годовой экономический эффект, руб.	1,529,437,800

В 1998 году появилось новое поколение систем автоматической диагностики машин, разработанное совместно специалистами России и США, и объединившее лучшие из свойств, как систем мониторинга, так и систем диагностики. Однако в теории и практике функционирования ремонтпригодных технических систем до сегодняшнего дня не найден комплексный критерий их эксплуатационной оценки. В работе [4] для комплексной оценки состояния технической системы с точки зрения ее потребительских свойств предлагается использовать параметр "функциональное состояние системы" (FS). Под функциональным состоянием (обобщенной характеристикой служебных свойств) системы понимается ее способность и потенциальные возможности выполнять свои функции в пределах допустимых отклонений по качеству и

свои функции в пределах допустимых отклонений по качеству и экономичности в течение срока ее службы при условии соблюдения оптимальной ремонтной стратегии. Методика определения параметра функционального состояния системы, как суммы состояний отдельных ее элементов, позволяет спрогнозировать значение FS в любой момент функционирования системы. Использование параметра FS возможно для: оценки ремонтных затрат за весь период функционирования системы; оптимизации конструкции системы с точки зрения минимизации ремонтных затрат в процессе эксплуатации; выработки оптимальной стратегии технического обслуживания и ремонта; выбора сроков, объема и технологии ремонта элементов системы.

Недостатком предложенного в [4] алгоритма определения параметра функционального состояния является его вероятностный и статический характер. Этот алгоритм не учитывает индивидуальных особенностей «старения» конкретного элемента системы, постройки и эксплуатации данной энергетической установки, что приведет к значительным погрешностям, особенно во второй половине жизненного цикла системы.

Для повышения эффективности решения подобных задач необходимо активное использование искусственного интеллекта и его частного случая экспертных систем, представляющих собой программные комплексы, заменяющие человека в узких сферах интеллектуальной деятельности [5]. Методы работы с экспертными системами дают возможность накапливать большой объем информации, производить ее статистическую обработку.

Ниже предлагается алгоритм создания экспертной системы, которая в режиме реального времени могла бы определять значение параметра функционального состояния отдельных элементов и всей энергетической установки в целом, используя результаты безразборного диагностирования без вывода установки из эксплуатации.

В соответствии с методикой, изложенной в [4], в любой момент времени t можно определить параметр FS функционального состояния установки

$$FS = \sum_1^s \mu_k E_i + \sum_1^z \mu_n G_j,$$

где E_i - значение параметра состояния конструктивного элемента;

s - количество конструктивных элементов;

μ_k - коэффициент влияния параметра функционального состояния данного конструктивных элементов на состояние системы;

G_j - значение параметра состояния неконструктивного элемента;

z - количество неконструктивных элементов;

μ_n – коэффициент влияния параметра функционального состояния данного неконструктивных элементов на состояние системы.

С другой стороны, если в этот же момент времени произвести безразборную диагностику, то прогнозируемому значению функционального состояния системы будет соответствовать n -мерный вектор значений диагностических параметров D_n . Следовательно, параметр функционального состояния любого элемента можно представить в виде функции диагностических параметров

$$FS = f(\overline{Dn}) = f(D_1; D_2; \dots; D_n).$$

Проблема заключается в определении вида зависимости, параметров модели и степени влияния того или иного диагностического параметра на значение параметра функционального состояния. Сегодня известно множество численных методов автоматического поиска структуры аппроксимирующего полинома при регрессионном описании объекта исследования. Проведенный анализ различных методов позволяет сделать выбор в пользу следующего алгоритма.

На основе экспериментальных данных требуется построить статистическую модель процесса при условиях отсутствия сведений о структуре самой модели и пассивного характера экспериментального материала.

Пусть $D_1; D_2; \dots; D_n$ – независимые факторы, оказывающие влияние на величину FS . В случае, если вид связи величины FS и независимых переменных $D_1; D_2; \dots; D_n$ описывается квадратичной функцией, имеем

$$FS = a_0 + a_1 D_1 + a_2 D_2 + \dots + a_n D_n + a_{n+1} D_1^2 + a_{n+2} D_2^2 + \dots + a_{2n} D_n^2 + a_{2n+1} D_1 D_2 + \dots + a_k D_{n-1} D_n. \quad (1)$$

Здесь $\overline{a} = |a_0, a_1, a_2, \dots, a_k|$ – неизвестные параметры модели;

$\overline{D} = |D_1, D_2, \dots, D_n|$ – известные в каждой i -й точке экспериментальные величины;

$$\overline{D}_i = |D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{in}|, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

N – число экспериментальных точек;

$K = 2N$ при максимальной степени аппроксимирующего полинома - 2.

Экспериментальная погрешность в определении независимых D_1, D_2, \dots, D_n в каждой i -й точке пренебрежимо мала по сравнению с ошибкой в определении целевых величин FS_i .

Линеаризируем (1), введя фиктивную переменную Z_i . Тогда (1) можно записать в виде

$$FS = a_0 D_0 + \sum_{i=1}^k a_i Z_i, \quad (2)$$

где

$$Z_1 = D_1, \dots, Z_n = D_n, Z_{n+1} = D_1 * D_1, \dots, Z_{2n} = D_n * D_n, Z_{2n+1} = D_1 * D_2, \dots, Z_k = D_{n-1} * D_n.$$

Перепишем уравнение (2) для всех i точек, при этом положив $D_0 = 1$

$$\begin{aligned} FS_1 &= a_0 + \sum_{j=1}^k a_j Z_{1j} \\ FS_2 &= a_0 + \sum_{j=1}^k a_j Z_{2j} \dots \dots \dots \\ FS_n &= a_0 + \sum_{j=1}^k a_j Z_{nj} \end{aligned} \quad (3)$$

На основании (3) введем матрицу-столбец выходных величин $FS^T = [FS_1, FS_2, \dots, FS_n]$ и матрицу

$$F = \begin{pmatrix} 1 & Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} \\ 1 & Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \dots & Z_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & \dots & Z_{nk} \end{pmatrix}$$

По заданным значениям элементов матриц F и FS необходимо определить параметры модели таким образом, чтобы взвешенная сумма квадратов (остаточная дисперсия) обратилась в минимум, то есть

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{N - (K + 1)} \sum_{i=1}^N (FS_i - \widetilde{FS}_i)^2 \longrightarrow \min, \quad (4)$$

где \widetilde{FS}_i - расчетная величина FS после подстановки всех значений матрицы F и параметров модели.

Наложим на экспериментальные величины три ограничения:

- результаты эксперимента не содержат систематических ошибок;
- результаты наблюдений во всех точках независимы и не коррелированы между собой;
- дисперсия результатов во всех точках одинакова, то есть $\sigma^2 = \text{const}$.

Тогда параметры модели можно найти из уравнения

$$\bar{a} = [F^T F]^{-1} F^T FS. \quad (5)$$

Индекс «Т» обозначает транспонирование матрицы, а индекс «-1» - ее обращение. Матрица $C = [F^T F]^{-1}$ называется дисперсионной, ее диагональные элементы C_{ij} используются для вычисления доверительных интервалов истинных параметров \hat{a}_j по формуле

$$|a_j - \hat{a}_j| \leq \varepsilon \sqrt{C_{ij}},$$

где \hat{a}_j - истинное значение параметра a_j ;

σ^2 - дисперсия наблюдений;

ε - значение, взятое из таблицы t-распределения с числом степеней свободы $N - (K + 1)$.

Однако в общем случае дисперсия ошибок наблюдений σ^2 неизвестна и должна быть оценена с помощью полученных экспериментальных данных. При этом может быть использована остаточная сумма квадратов $S_{\text{ост}}^2$

$$|a_j - \hat{a}_j| \leq \varepsilon \sqrt{C_{ij}} S_{\text{ост}}.$$

Для каждого коэффициента a_j определяем t_j - оценки, позволяющие проранжировать факторы по величине их значимости

$$t_j = \frac{|a_j|}{S_{\text{ост}} \sqrt{C_{ij}}}.$$

Из (4) следует, что для расчета параметров модели всегда должно выполняться соотношение $N \geq K + 2$. Вместе с тем модель (2) из соображений адекватности представления экспериментальных данных

может потребовать больших степеней аппроксимирующего полинома, то есть определения большего числа коэффициентов a_j в полном разложении и в связи с этим данное соотношение выполняться не будет.

В созданной программе предложен способ, позволяющий при машинном поиске структуры регрессионной модели исключать часть линеаризованных переменных Z_i . Каждому столбцу матрицы F в соответствии ставится ячейка α , состоящая из нулей и единиц, которые определяют двоичный код целого числа. Эти нули и единицы управляют матрицей F , исключая из нее соответствующие нулевые столбцы. Тем самым из матрицы выделяется подматрица, число столбцов которой равно числу единиц ячейки α . После расчета параметров усеченной модели определяется остаточная дисперсия и расчет повторяется сначала с измененным порядком нулей и единиц в ячейках. Правило останова задается условием достижения требуемого значения остаточной дисперсии либо максимальным числом «просчитываемых» моделей.

Используя значения параметра функционального состояния, полученные на основании анализа результатов безразборного диагностирования, можно уточнить стратегию функционирования ремонтпригодной технической системы, что позволит значительно сократить затраты на ее техническое обслуживание и ремонт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брюль и Кьер, Мониторизация состояния машинного оборудования. DK BR 0660-11.
2. Electric Power Research Institute (EPRI) Issues, Palo Alto, 1998.
3. Barkov, N. A. Barkova, J.S. Mitchell, "Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings", *Sound and Vibration, Part 1, June, 1999. P. 10-17. Part 2, September, 1999. P. 27-31.*
4. Шахов А.В. Моделирование процесса «старения» ремонтпригодных технических систем // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2002. - № 9. – С. 81–90.*
5. *Практическое введение в технологию искусственного интеллекта и экспертных систем с иллюстрациями на Бейсике / Р.Левин, Л.Дранг, Б.Эдельсон: Пер. с англ. –М.: Финансы и статистика, 1990. – 239 с.*

УДК 621.793.3: 629.12.004.67 (075)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РВС-ТЕХНОЛОГИИ В ПАРАХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

В.П. Матвеевко, И.В. Виниченко, С.А. Кубыщенко

Основной причиной выхода из строя машин и механизмов, в том числе судовых, портовых и т.д., являются отказы в работе узлов трения. Для решения проблемы повышения эксплуатационного ресурса узлов трения машин и механизмов в последние годы используются новые технологии, позволяющие улучшать триботехнические характеристики поверхностей трения сопрягаемых деталей. Это достигается за счет применения ремонтно-восстановительного состава (РВС) в качестве добавки в смазку.

В настоящей статье освещаются результаты экспериментальных исследований влияния РВС производства НПО «Руспромремонт» (СПб, Россия совместно с фирмой RVS-Tec Oy Хельсинки, Финляндия) на триботехнические характеристики материалов пар трения скольжения с целью определения эффективности и возможности их применения в узлах трения судовых и портовых машин и механизмов. Исследования проводились в лаборатории трения и износа Одесского национального морского университета.

Материалы и методика исследований

Для образцов пар трения были выбраны материалы, широко применяемые в машиностроении, в частности для изготовления деталей узлов трения судовой и портовой техники:

- сталь 40Х – чугун АЧС-3 – для первой пары образцов;
- бронза БрОЦ10-2 – Сталь40Х – для второй пары образцов;
- чугун СЧ25 – чугун СЧ25 – для третьей пары образцов.

В качестве смазки использовались масла, соответственно для каждой пары трения, следующих марок:

- ДИЗОЛА М3015 [М-10Г₂(ц)];
- МС20;
- ДИЗОЛА М3004 [М-10В2(с)].

Добавка РВС в смазку для каждой пары составляла 0,2 % от объема масла.

Образцы первой и второй пар трения исследовались на машинах трения АЕ-5, по схеме кольцо–диск, а третьей пары – на реверсивной машине трения типа 77МТ-1 по схеме, имитирующей сопряжение поршневое кольцо–втулка цилиндра (плоский сегмент кольца – плоский сегмент втулки).

Шероховатость поверхностей трения образцов составляла 0,63 мкм. Исследования на всех машинах проводились в два этапа:

- 1 – работа на масле;
- 2 – работа на масле с добавкой РВС.

При этом скорости скольжения и нагрузки соответственно номерам пар трения:

- 1) $V = 2,19$ м/с, $P = 55$ кг/см²;
- 2) $V = 3,45$ м/с, $P = 12$ кг/см²;
- 3) $V = 0,3$ м/с, $P = 112$ кг/см²;

при температуре окружающей среды 18-25°C.

Температура у поверхности трения измерялась с помощью термопары медь-константан. Момент трения измерялся с помощью устройства, позволявшего уравновесить усилия на рычаге стержня с закрепленным на его конце образцом.

Величина износа определялась методом искусственных баз (точность измерения h составляла $\pm 0,5$ мкм) на приборе Виккерса.

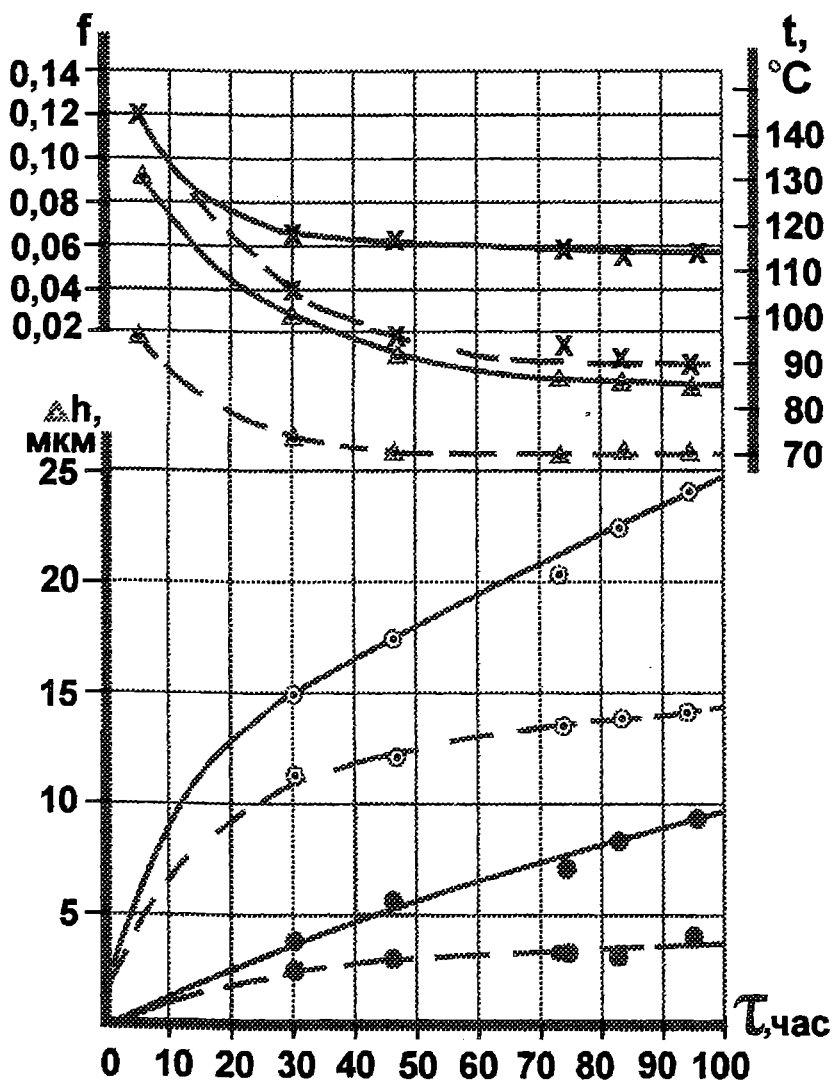
Результаты исследований

В ряде работ зарубежных авторов [1, 2, 3] показано, что РВС относятся к разряду твердофазных смазок, изготавливаемых на основе геоактиваторов. Они представляют собой многокомпонентную смесь минералов-серпентинитов, хлоритов, каолинитов и др. В парах трения геоактиваторы РВС проявляют защитные свойства против основных разрушающих факторов, таких как электрохимическая коррозия, истирание, водородное охрупчивание и т.д. Восстанавливающее свойство их объясняется образованием при определенных условиях металлокерамического слоя на поверхностях трения. Одновременно отмечается, что среди обширного комплекса технологических свойств минералов менее всего изучены их триботехнические свойства. Поэтому настоящие исследования можно рассматривать как результаты сравнительных испытаний, отражающих влияние РВС на триботехнические характеристики вышеуказанных материалов пар трения.

Результаты испытания первой пары трения кольцо-диск представлены на рис. 1 в виде кривых износа поверхностей образцов, а также изменения температуры и коэффициента трения в зависимости от времени для обоих этапов работы: на масле и на масле с добавкой РВС.

Анализ полученных результатов показывает, что при работе на масле в течение первых 30 часов, в процессе приработки, получены наибольшие средние значения интенсивности износа – 0,5 мкм/ч для кольца и 0,13 мкм/ч для диска. Затем имеет место выход на этап стабилизации, о чем свидетельствует снижение значения температуры, коэффициента трения и скорости изнашивания. Испытания на масле с добавлением РВС показывают, что износ поверхностей трения образцов после первых 30 часов работы стального кольца уменьшается на 30 %, а чугунного диска на 37,5 % по сравнению с теми же при работе на масле.

На последующих режимах испытаний, на этапе стабилизации, абсолютный износ стального кольца в 2-2,5 раза меньше и чугунного диска в среднем в 3 раза меньше, чем при испытаниях на масле без добавления РВС.



— работа на масле; - - - работа на масле + РВС

Рис. 1. Кривые износа образцов: кольцо (⊙) — диск (●), изменение коэффициента трения (x) и температуры (Δ) в зависимости от времени испытаний (τ)

Результаты испытаний второй пары образцов бронза-сталь, работавших по схеме кольцо-диск, представлены на рис.2 в виде кривых изменения триботехнических параметров в зависимости от времени для обоих этапов: работе на масле и на масле с добавкой PBC.

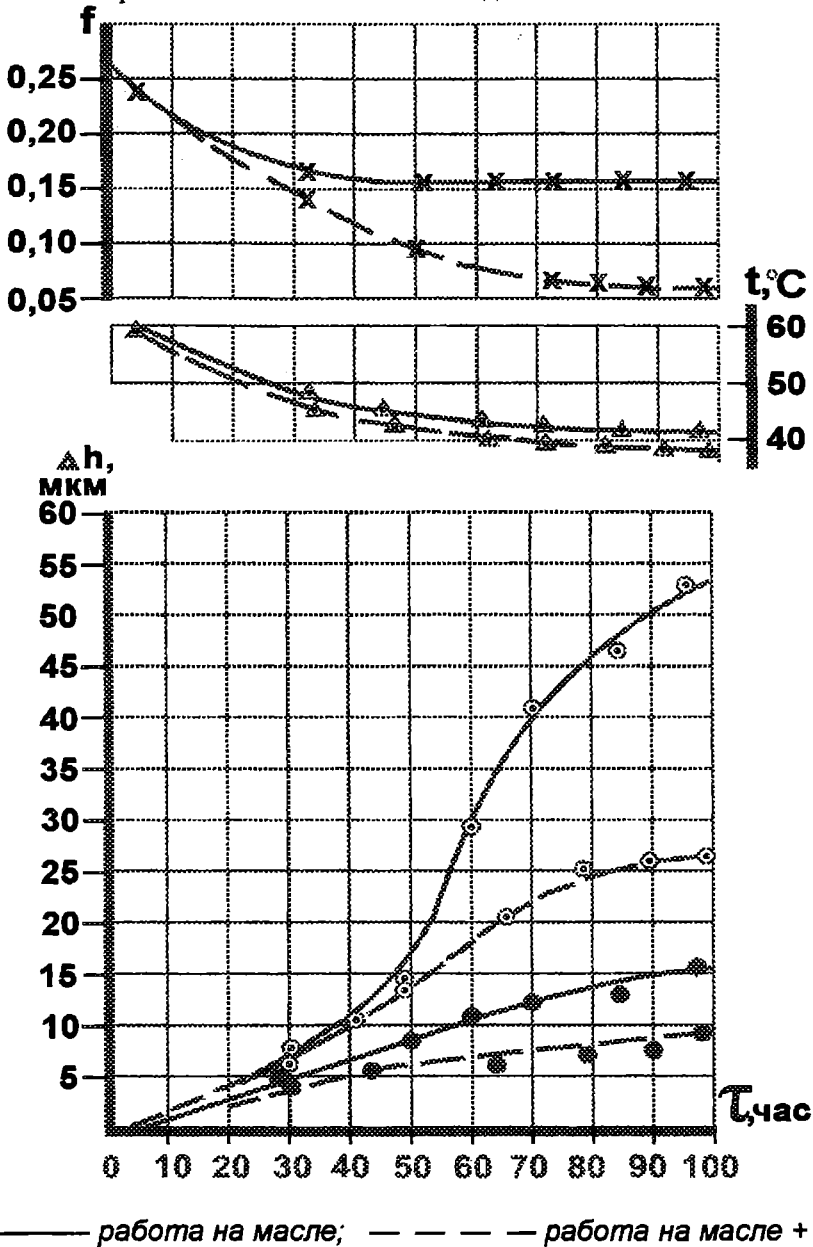


Рис. 2. Кривые износа образцов: кольцо (●) – диск (○), изменение коэффициента трения (x) и температуры (Δ) в зависимости от времени испытаний (τ)

Анализ полученных результатов показывает, что в течение первых 48 часов работы интенсивность износа бронзового кольца как при работе на масле, так и на масле с добавлением РВС одинакова. После выхода на этап стабилизации износ кольца при работе на масле с добавлением РВС уменьшился на 20 %. Скорость изнашивания стального диска в течение первых 30-ти часов также оставалась одинаковой при работе на масле и на масле с добавкой РВС. Однако в последнем случае процесс стабилизации наступил раньше, и абсолютные значения износа при этом в два раза уменьшились, о чем свидетельствует снижение коэффициента трения и уменьшение температуры.

Результаты испытаний третьей пары образцов чугун СЧ25–чугун СЧ25, работавшей по схеме плоский сегмент кольца–плоский сегмент втулки цилиндра представлены на рис. 3.

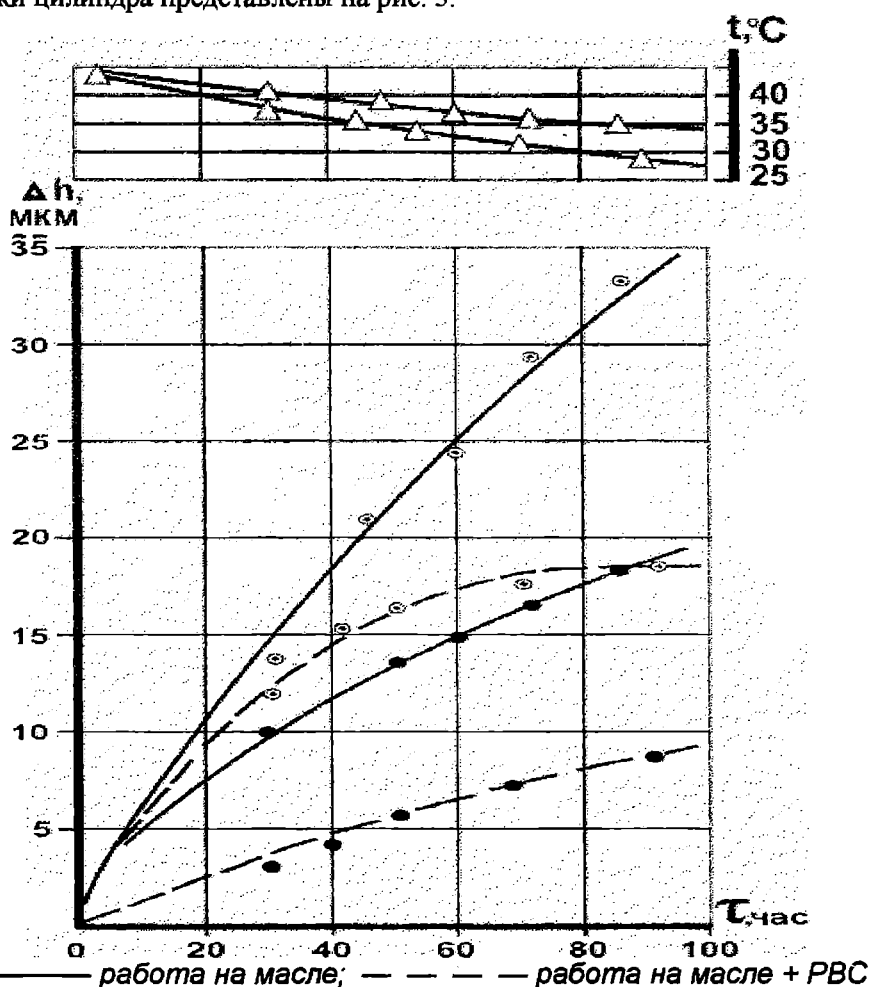


Рис. 3. Кривые износа образцов: кольцо (○) – пластина (●), изменение температуры (Δ) в зависимости от времени испытаний (τ)

Анализ кривых износа поверхностей образцов в зависимости от времени испытаний показывает, что при работе на масле в течение всего периода времени более интенсивно изнашивается сегмент кольца. При работе на масле с добавлением РВС через 40 часов процесс износа сегмента кольца стабилизируется, скорость изнашивания уменьшается, значение абсолютного износа в два раза ниже, чем при работе на масле. Абсолютные значения износа сегмента втулки на первом режиме работы на масле, приработке, близки к тем, что получены для сегмента кольца. На последующих режимах износ сегмента втулки уменьшается по сравнению с сегментом кольца от 80 до 100 %. При работе на масле с добавлением РВС скорость изнашивания сегмента втулки значительно меньше, чем при работе на масле и после 50 часов работы на обоих этапах стабилизируется. Абсолютные значения износа сегмента втулки при работе с добавкой РВС уменьшаются от 2 до 2,5 раз.

Выводы

Результаты проведенных экспериментальных исследований по проверке эффективности ремонтно-восстановительного состава производства НПО «Руспромремонт» (СПб, Россия совместно с фирмой RVS-Тес Оу Хельсинки, Финляндия) свидетельствуют о следующем:

1. Использование РВС в качестве добавки в смазку является эффективным средством для улучшения триботехнических характеристик материалов пар трения в условиях исследованных нагрузок, скоростей и температур.

2. Добавление РВС в количестве 0,2 % от объема масла позволяет ускорить процесс приработки пар трения и на этапе стабилизации уменьшить интенсивность износа поверхностей трения от 2 до 2,5 раз.

3. Целесообразно провести сравнительные натурные испытания с применением РВС в узлах трения судовых и портовых машин и механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. РВС нового поколения // *Промышленный вестник*. 2001. – № 7. – С. 20.
2. Червоненко Ю.А. Геоактиваторы РВС – что это? // *Промышленный вестник*. – 2001. – № 8. – С. 23-25.
3. Отличие РВС от присадок // *Промышленный вестник*. – 2001. – № 9. – С. 17.

УДК 620.17.519

ПІДСУМУВАННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ І ОЦІНКА КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ ДЕТАЛЕЙ

М.В.Олійник

Неможливо перерахувати кількості праць, що порушують питання щодо можливості приймати граничне нагромаджене пошкодження при нерегулярному навантаженні деталей за одиницю згідно з лінійною гіпотезою. Підкреслимо, що йдеться саме про граничне пошкодження на момент зруйнування деталі, а не про невідповідність підсумування пошкоджень лінійній гіпотезі на проміжних стадіях. Згадана невідповідність не викликає заперечень. Інша справа – граничне пошкодження.

Стохастичний або упорядкований режим нерегулярного навантаження так чи інакше можна звести до дискретного режиму з довільною кількістю сходинок. Це не викличе суттєвих труднощів: адже сучасна обчислювальна техніка дозволяє маніпулювати будь-якою кількістю сходинок. Тому далі матимемо на увазі саме дискретний режим нерегулярного навантаження як найбільш загальний. За таких умов суму втомних пошкоджень визначають як

$$\sum_{i=1}^k (n_i / N_i) = a, \quad (1)$$

де k – кількість сходинок спектра навантаження;

n_i – напрацювання за весь термін роботи деталі до зруйнування при напрузі σ_i ;

N_i – довговічність при напрузі σ_i , яку обчислюють за рівнянням кривої втоми або відшуковують експериментально (можливість визначати N_i експериментально є перевагою при дискретному режимі навантаження);

a – граничне нагромаджене пошкодження, яке відповідно до лінійної гіпотези підсумування пошкоджень у канонічному вигляді приймають $a = 1$.

Протягом багатьох десятиліть точаться суперечки, чи можна приймати на практиці суму a за одиницю і довговічність N_{Σ} деталі до зруйнування визначати за формулою, яка впливає з формули (1),

$$N_{\Sigma} = a / \sum_{i=1}^k (\beta_i / N_i), \quad (2)$$

але при $a = 1$, де β_i – відносна тривалість дії напруги σ_i до зруйнування деталі, $\beta_i = n_i / N_{\Sigma}$.

Звісно, що підрахунки довговічності N_{Σ} за формулою (2) безпосередньо залежать від конкретного значення цієї суми. Якщо ж зважити на те, що за багатьма даними сума a на порядок може відрізнятись від одиниці, то зрозуміло, що інтервал її змінювання цікавить дослідників. Через те і виникли різні способи коригування лінійної гіпотези попри того, що й некоригована гіпотеза у багатьох випадках приводила до задовільних результатів [1-6]. Той факт, що емпіричні граничні суми a циклових відношень n_i / N_i можуть значно відхилятись від одиниці в той чи інший бік слугують приводом для критичних висловлювань проти лінійної гіпотези при $a = 1$, зокрема, проти використання її при обробці результатів прискорених випробувань, побудованих на цій гіпотезі. Що можна протиставити добре відомим фактам і як захистити прийнятність за певних умов лінійної гіпотези в практичних прикладеннях? Виявляється, є відповідні аргументи. Ця праця якраз про них.

По-перше, експериментальну перевірку гіпотези не можна визнати коректною. При обчисленні циклових відношень n_i / N_i доводиться напрацювання n_i деталі при нерегулярному навантаженні зіставляти з довговічностями N_i при тих же напругах, але вже інших деталей, бо випробувати ту ж саму деталь, що зруйнувалася при нерегулярному навантаженні, вдруге, при регулярному навантаженні неможливо. Але властивості ідентичних з зовнішнього боку деталей не збігаються. Навпаки, вони можуть дуже відрізнятись. Навіть тоді, коли довговічності N_i розглядають як усереднені, наприклад за квантильними кривими втомі, зазначена некоректність нівелюється, але не зникає. Тому експериментальна перевірка прийнятності лінійної гіпотези шляхом випробувань на втому деталей при нерегулярному і регулярному навантаженнях, строго кажучи, не в змозі ні стверджувати, ні спростовувати лінійну гіпотезу. Це було б можливим лише за умови абсолютної відсутності розсіювання втомних властивостей випробуваних деталей, яке слід вважати неминучим. Отже, будь-які заперечення щодо прийнятності чи неприйнятності лінійної гіпотези на базі згаданих дослідів не є доказовими: вони виникають на тлі формальних уявлень і не враховують того, з якою метою застосовується ця гіпотеза. Було б неприродним, якби такі коливання у викладеному розумінні не спостерігалися.

По-друге, при значному збільшенні числа спостережень, коли про напрацювання при нерегулярному навантаженні та про довговічності при регулярному навантаженні стає можливим судити по усталених математичних сподіваннях і за ними підраховувати відносні довговічності (циклові відношення n_i / N_i) та їхні суми, граничне пошкодження a значно менше відхиляється від одиниці, менш аніж удвічі в обидва боки. Це

свідчить про те, що при необмеженому збільшенні обсягів виборок (тобто з переходом до генеральної сукупності) граничне пошкодження a буде прямувати до величини, близької до одиниці [7-9].

Тоді з деяким наближенням можна говорити про прийнятність лінійної гіпотези для інженерних розрахунків і тим більше для обробки результатів прискорених випробувань на втому. Що стосується останнього, то слід зазначити, що й помітні відхилення суми a від одиниці мало впливають на точність оцінювання характеристик опору втомі [7]. Питання стосовно того, яких відхилень сум a від одиниці можна припускати при обробці результатів прискорених випробувань при монотонно зростаючому навантаженні, аби похибка не виходила за передбачені межі, дістали несподіване розв'язання. Виявилось, що навіть при $0,5 \leq a \leq 2,0$ похибки оцінок границі витривалості не сягали 10 %, а параметрів похилого відрізка кривої втомі – 15 %, що можна вважати прийнятним [7].

По-третє, на користь лінійної гіпотези свідчить ще й той факт, що якщо якимось чином оцінювати довговічності N_i деталі, яка випробувалася при нерегулярному навантаженні, і використовувати ці довговічності (вони ж бо індивідуальні) при підрахунках циклових відношень, то граничні суми a ще менше будуть відрізнятися від одиниці [6]. У роботі [6] індивідуальні довговічності N_i визначали з позицій зміни петлі гістерезиса при циклічному деформуванні. Проте, певно, надійніше для практики відтворення індивідуальної (вихідної) кривої втомі можливе за зв'язками поміж її параметрами [2, 10-12].

Індивідуальна крива втомі, нехай навіть побудована з певним наближенням, повніше віддзеркалює поведінку конкретної деталі, аніж будь-яка усереднена крива партії деталей. Взагалі, зіставлення індивідуальних властивостей деталі з усередненими властивостями групи деталей лише вказує на випадкові відхилення поодинокого від середнього, але не може слугувати мірилом відмінності (різниці) середніх. Зіставляючи напрацювання n_i з індивідуальними довговічностями N_i , обчисленими за кривою втомі, притаманною деталі, що зруйнувалася при нерегулярному навантаженні, можна дійти висновку щодо справедливості лінійної гіпотези. Далі буде показано, за яких очевидних умов справедливість лінійної гіпотези підсумування втомних пошкоджень підтверджується, якщо цими умовами не нехтувати.

По-четверте, як для розрахунків довговічності до зруйнування, так і для обробки результатів прискореного випробування необов'язково знати закон накопичування пошкоджень у матеріалі деталі, бо йдеться про граничні характеристики, а не про ті, що відповідають якійсь частині використаного ресурсу. Саме тому прогнозування цих характеристик, зокрема, довговічності N_{Σ} деталей на стадії проектування можливе на підставі лінійної гіпотези [1, 2, 8, 9], яка хоча й невірно відображує процес накопичення пошкоджень, але приблизно вірно передбачає

момент його завершення. На перший погляд таке явище видається парадоксальним, та воно досить часто використовується на практиці. Наприклад, коефіцієнт інтенсивності напруження в вершині тріщини не дає уявлення про напружений стан поблизу дна тріщини, але з успіхом використовується для оцінки несучої здатності деталей з тріщинами [3,6]. Поза сумнівів, не відображає істинного напруженого стану в поверхневих шарах зони контакту двох деталей і формула Герца, попри це вона знайшла широке застосування в розрахунках підшипників кочення, зубчастих і інших передач [13]. На допомогу прийшло визначення допустимих напруг у цих розрахунках з використанням тієї ж формули. Отже, і в даному разі слід зважати на необхідність виходити при застосуванні лінійної гіпотези з індивідуальних кривих втоми, а не якихось інших кривих.

Тому, по-п'яте, може бути неоднакове ставлення до лінійної гіпотези при використанні її для прогнозування довговічності на стадії проектування деталей і для визначення вихідних властивостей поодинокі деталі, що зруйнувалася. До цього питання ми ще будемо звертатися нижче.

У практичних розрахунках нерегулярний режим зводять до еквівалентного регулярного, припускаючи, що останній можна віднести до однієї з напруг нерегулярного режиму, найчастіше до максимальної напруги, яку прийнято позначати σ_1 (тоді у варіаційному ряді напруга σ_k буде найменшою з напруг). Наприклад, при використанні степеневого рівняння похилого відрізка кривої втоми

$$\sigma^m \cdot N = \sigma_R^m \cdot N_G = 10^C = const \quad (3)$$

і припущення, що всі напруги спектра перевищують границю витривалості σ'_R деталі, умову еквівалентності можна записати так:

$$\sum_{i=1}^k (\sigma_i^m \cdot n_i) = \sigma_1^m \cdot N_E \quad (4)$$

У виразах (3) і (4) σ і N – поточні напруга і відповідна довговічність до зруйнування;

σ'_R і N_G – границя витривалості і довговічність, за якою похилий відрізок кривої втоми переходить у горизонтальний (абсциса точки перелому кривої втоми);

m і C – параметри похилого відрізка кривої втоми;

k – кількість сходінок нерегулярного режиму навантаження;

σ_i – напруга i -тої сходінки;

n_i – напрацювання до зруйнування деталі на рівні сходінки σ_i ;

σ_1 – найбільша з напруг нерегулярного режиму;

N_E – так звана еквівалентна довговічність регулярного режиму (так її прийнято називати).

Формула (4) як і споріднені з нею формули переходить із однієї праці чи підручника до іншої. Але ніхто не акцентує уваги на тому, до якої кривої втомі параметр m у формулі (4) належить. Одна справа, якщо мається на думці індивідуальна крива і зовсім інша, якщо мимоволі йдеться про якусь абстраговану криву, аж ніяк не пов'язану з дослідною деталлю. А саме таке має місце на практиці. Тому визначення довговічності N_E з формули (4), до якого вдаються у багатьох випадках, наприклад при обчисленні коефіцієнта Y_N довговічності і режиму навантаження [13] в розрахунках зубчастих передач, може постати дуже наближеним.

Що стосується поняття еквівалентної довговічності N_E з формули (4) як довговічності при регулярному навантаженні на рівні σ_1 , то воно не витримує будь-якої критики. Хіба при напрузі σ_1 регулярного режиму довговічність не дорівнює N_1 ? Звісно, що дорівнює, і це закладено у формулу (4). Отже, довговічність N_E це й є довговічність N_1 , якщо дійсний спектр зводять до максимальної напруги. Неважко переконатися, що при будь-яких співвідношеннях σ_i/σ_1 і β_i з формули (4) випливає, що N_E дорівнює N_1 . Зведення дійсного спектра до іншої напруги, скажімо до напруги σ_i , приведе до того ж таки результату: буде $N_E = N_i$. Виходить, що так звана еквівалентна довговічність N_E залежить від того, до якої напруги зводять експлуатаційний спектр. Це можна вважати природним, але як тоді використовувати в розрахунках еквівалентну довговічність? Чому саме її треба відносити до максимальної напруги, а не до якоїсь іншої? І взагалі нащо її підраховувати за формулою (4), якщо можна призначати по довговічності N_i при напрузі σ_i за кривою втомі?

Стає зрозумілим, що для однозначного визначення еквівалентного режиму треба скористатися однозначним його показником. Ним може бути сумарне напрацювання N_Σ . Виходячи з нього і маючи на думці індивідуальну криву втомі деталі, що зруйнувалася при нерегулярному навантаженні, перехід до еквівалентного регулярного режиму можна подати у вигляді

$$\sum_{i=1}^k (\sigma_i^m \cdot n_i) = \sigma_E^m \cdot N_\Sigma = \sigma_E^m \sum_{i=1}^k n_i = 10^C, \quad (5)$$

де σ_E – еквівалентна напруга при регулярному навантаженні, що відповідає сумарному дійсному напрацюванню N_Σ і належить індивідуальній кривій втомі, а m і C – параметри цієї кривої.

Заміна дійсного нерегулярного режиму еквівалентним йому регулярним має принципове значення, на що в свій час вказувалося [2]. І дійсно, поділивши ліву і праву частини виразу (5) на 10^C і маючи на увазі рівняння (3), одержимо

$$\sum_{i=1}^k (n_i / N_i) = 1 \quad (6)$$

і тим підтвердимо справедливості лінійної гіпотези. Якби параметри m і C рівняння (3) не належали одній і тій же кривій втомі або хоч один з них належав іншій кривій, не було б підстав вираз (5) ділити на 10^C . В такому разі треба було б спиратися на формулу (1), а не на формулу (6) і знову повертатися до невизначеності щодо сум a .

Слід зазначити, що прийнятність формул (1), (2) і (6) до вжитку не вступає в протиріччя з результатами досліджень, наведеними у працях [8,9]. Якщо довговічність N_{Σ} за формулою (2) розглядати як математичне сподівання, пов'язане з математичними сподіваннями довговічностей N_i , тобто оцінювати її як характеристику статистичного колективу, а не окремо взятої деталі, то треба звертатися до рекомендацій, викладених у згаданих працях. Якщо ж відійти від випадкових величин, якими є довговічності N_{Σ} і N_i і сума a , а розглядати окрему деталь і її індивідуальну криву втомі, хоча і випадкову серед випадкових кривих ідентичних деталей, то формули (2) і (6) можна віднести до детермінованих величин: вони стосуються лише даної конкретної деталі.

Тоді, звертаючись до зв'язків $m = f(\sigma_R)$ і $C = F(\sigma_R)$ поміж параметрами кривої втомі за рівнянням (3) [1,11,12], вираз (5) можна подати у вигляді рівняння

$$\sum_{i=1}^k (\sigma_i^{f(\sigma')} \cdot n_i) - 10^{F(\sigma'_R)} = 0. \quad (7)$$

Виходячи з нього знаходимо границю витривалості деталі, що зруйнувалася при нерегулярному навантаженні, а відтак і параметри індивідуальної кривої втомі цієї деталі.

Таким чином, справедливості лінійної гіпотези підтверджується за прийнятих умов навантаження, що підсумування втомних пошкоджень проводиться по індивідуальній кривій втомі і що еквівалентність нерегулярного і регулярного режимів навантаження досягається по співпаданню напрацювань. При цьому саме рівняння кривої втомі принципової ролі не відіграє: лінійна гіпотеза підтверджується, а вираз, аналогічний виразові (7), можна використати для визначення границі витривалості при будь-якому рівнянні, аби тільки зв'язки між його параметрами були відомі. Наприклад, якщо криву втомі підпорядкувати рівнянню Вейбулла

$$(\sigma - \sigma_R)^{m_w} \cdot N = 10^{C_w} = const, \quad (8)$$

де всі величини аналогічні відповідним величинам рівняння (3), то еквівалентність режимів запишеться у вигляді

$$\sum_{i=1}^k [(\sigma_i - \sigma_R)^{m_w} \cdot n_i] = (\sigma_E - \sigma_R)^{m_w} \cdot N_{\Sigma} = 10^{C_w}, \quad (9)$$

де прийнято $\sigma_i > \sigma_R$.

Поділивши ліву і праву частину виразу (8) на 10^{C_w} і враховуючи рівняння (8), знову приходимо до виразу (6), тобто підтверджуємо лінійну гіпотезу. Маючи зв'язки $m_w = f_w(\sigma_R)$, $C_w = F_w(\sigma_R)$ [12,14], складаємо рівняння, подібне рівнянню (7)

$$\sum_{i=1}^k [(\sigma_i - \sigma_R)^{f_w(\sigma_R)} \cdot n_i] - 10^{F_w(\sigma_R)} = 0, \quad (10)$$

і знаходимо границю витривалості σ_R , як і в першому випадкові. За зв'язками відшукуємо і останні параметри рівняння (8) індивідуальної кривої втоми. Висловлене можна продовжити і стосовно інших моделей кривої втоми. Отож при використанні індивідуальної кривої втоми і спектрі навантаження, коли всі напруги спектра перевищують границю витривалості деталі, лінійна гіпотеза безумовно підтверджується.

Можна стверджувати, що в розглянутому поодинокому випадку при використанні індивідуальної кривої втоми і прийнятих припущень не виникне заперечень щодо прийнятності лінійної гіпотези. Але розглянутий поодинокий випадок зустрічається рідко і відповідає порівняно малим загальним напрацюванням N_Σ . Реальні режими навантаження, як правило, містять і більші за границю витривалості деталі напруги, і менші, а то й набагато менші. Серед малих напруг можуть бути такі, що в сполученні з тими, що перевищують границю витривалості деталі, не викликають пошкодження матеріалу деталі і їх треба було б відкинути, як і ту частку загального напрацювання, яка припадає на них. Залишити треба лише ті малі напруги, які в сполученні з перевантаженнями додають пошкодження деталі. Інакше кажучи, треба кожного разу знати ту межу – нижню границю пошкоджуючих напруг, – яка поділяє малі напруги на пошкоджуючі і непошкоджуючі. А це не проста задача, бо нижня границя пошкоджуючих напруг залежить від низки факторів [2].

Пропонується інший підхід, який не спростовує роль нижньої границі пошкоджуючих напруг, але не вимагає її конкретного обчислення. Цей досить апробований підхід полягає в заміні дійсного багатоступінчастого спектра з різними напругами в ньому еквівалентним двоступінчастим спектром за таких умов. Номінальна напруга σ_1 спектра, напрацювання n_1 при ній і загальне напрацювання N_Σ залишаються однаковими для обох режимів. Тоді для еквівалентного двоступінчастого спектра будуть відомими:

$$\begin{aligned} \sigma_1, n_1, N_\Sigma, \beta_1 &= n_1/N_\Sigma, \\ n_{2E} &= N_\Sigma - n_1, \\ \beta_{2E} &= 1 - \beta_1 = n_{2E}/N_\Sigma. \end{aligned}$$

Невідомими будуть

$$\sigma_{2E}, N_1 \text{ і } N_{2E}.$$

Менша напруга σ_{2E} еквівалентного двоступінчастого спектра послуговує еквівалентом всіх напруг дійсного спектра від σ_2 до σ_k . Про неї можна сказати, що вона обов'язково повинна перевищувати границю витривалості σ_R . Інакше двоступінчастий спектр перетворився б у регулярне навантаження напругою σ_1 . Адже окрім цієї напруги в дійсному спектрі є й такі, що пошкоджують матеріал деталі. А значить, напруга σ_{2E} повинна бути пошкоджуючою, а довговічність N_{2E} при ній в регулярному режимі повинна бути довговічністю до зруйнування, якою б великою вона не була.

Для описання залежності довговічності від напруги користуємося кривою втомки нової форми [15] з лівим відрізком за степеневію і правим відрізком за уніфікованою функцією Вейбулла. Довговічність N_1 при нарузі σ_1 і регулярному навантаженні у першому наближенні можна обчислювати і за функцією правого відрізка, тобто користуватися правим відрізком кривої втомки нової форми, не вносячи суттєвої похибки в розрахунки.

Ці міркування мають другорядне значення. Головним є те, що дійсний спектр зведено до такого еквівалентного, у якого всі напруги перевищують границю витривалості. В такому разі можна без будь-яких обмежень застосовувати лінійну гіпотезу, а це означає, що її можна застосовувати завжди.

Розглянемо тепер практичні прикладення цього висновку.

Для двоступінчастого спектра формула (2) переписується у вигляді

$$N_{\Sigma} = 1/(\beta_1/N_1 + \beta_{2E}/N_{2E}). \quad (11)$$

Якщо розміри деталі, напруга σ_1 , режим навантаження β_1 і β_{2E} відомі, а треба забезпечити задане напрацювання N_{Σ} і оцінити потрібну конструкційну міцність деталі, при якій це стане можливим, то виходячи з виразу (11) знаходимо спочатку довговічність N_{2E}

$$N_{2E} = \beta_{2E}/(1/N_{\Sigma} - \beta_1/N_1). \quad (12)$$

Для цього треба задатися довговічністю N_1 , що неважко зробити, бо завжди бажано, щоб вона була якнайменшою, але відповідала багатоциклової області. Проте необхідно, як видно з виразу (12), мати

$$1/N_{\Sigma} > \beta_1/N_1, \quad (13)$$

з чого випливає, що мінімальне значення довговічності N_1 становить

$$N_1 = \beta_1 \cdot N_{\Sigma} = n_1. \quad (14)$$

Але при такій довговічності ресурс деталі був би використаний повністю при нарузі σ_1 , що виключається, відхиляє вираз (14) і

зумовлює довговічність N_1 приймати більшою. Припустимо, що різниця за виразом (13) дорівнює x , тобто

$$1/N_{\Sigma} - \beta_1/N_1 = x > 0. \quad (15)$$

Тоді N_1 повинна скласти

$$N_1 = \beta_1 / (1/N_{\Sigma} - x) \quad (16)$$

і бути не меншою, скажімо, за $10^{5,1}$ циклів і більшою за n_1 .

Зупинившись на довговічності N_1 за виразом (16), знаходимо: потрібну границю витривалості σ_R за виразом [15]

$$\sigma_R = \sigma_1 / (1 + 10^{5,1} / N_1), \quad (17)$$

довговічність N_{2E} за виразом (12), напругу σ_{2E} за виразом

$$\sigma_{2E} = \sigma_R (1 + 10^{5,1} / N_{2E}) \quad (18)$$

і відношення $f = \sigma_{2E} / \sigma_R$ за виразом

$$f = 1 + 10^{5,1} / N_{2E}. \quad (19)$$

Зберігаючи відношення f і довговічність N_1 , можна досягти деякої зміни напрацювання N_{Σ} при тій же конструкційній міцності деталі за рахунок зміни величини x за виразом (15). Зберігаючи x , того ж можна досягти за рахунок відношення f за виразом (19). Якщо відношення f зафіксувати, то для збільшення напрацювання N_{Σ} доведеться збільшувати довговічність N_1 , а значить, збільшувати і границю витривалості, тобто конструкційну міцність деталі за виразом (17).

Якщо розміри деталі невідомі і треба провести проектувальний розрахунок для їх визначення і оцінки міцності деталей при заданому напрацюванні N_{Σ} і режимі у навантаженнях (силах чи моментах, які позначаємо F незалежно від того, чи то сили, чи моменти), то, як і в попередньому випадку, режим зводимо до двоступінчастого з F_1 і F_{2E} , користуючись виразами (11)-(16) і підібравши довговічності N_1 і N_{2E} .

За виразом (17) знаходимо граничне навантаження F_R , яке відповідає границі витривалості σ_R , поки що невідомій. Вирази (17)-(19) залишаються незмінними як при використанні кривої втоми в напругах, так і при використанні кривої втоми в навантаженнях [15]. За виразами (18) і (19) знаходимо навантаження F_{2E} і відношення f . Але для визначення вихідних (стартових) розмірів деталі цих даних замало.

Будуємо криву втоми нової форми в навантаженнях. Визначаємо абсцису N_{II} точки перетину її відрізків

$$N_{II} = N_G = 10^{5,1} / [(F'_R / F_R) - 1], \quad (20)$$

де F'_R – ордината точки перетину, є обмеженим граничним навантаженням по відношенню до граничного навантаження F_R і відповідає довговічності N_G , обмеженій границі витривалості σ'_R ;

F_R – граничне навантаження, знайдене за виразом (17), відповідає нескінченно великій довговічності, границі витривалості σ_R .

Встановлено [16], що відношення $\sigma'_R / \sigma = F'_R / F_R$ змінюється в вузьких межах у залежності від міцності сталених деталей. Наприклад, для деталей з границею витривалості σ_R від 90 до 200 МПа (це найуживаніший інтервал) вказане відношення змінюється від 1,08 до 1,04. У першому наближенні (для проектувального розрахунку) приймемо його як середнє 1,06. Це забезпечує прийнятну точність оцінки абсциси N_{II} , яку на стадії перевірного (уточненого) розрахунку можна уточнити при необхідності. Уточнення можуть знадобитися і в зв'язку з доцільністю коригування зв'язків між параметрами кривої втоми при асиметричних циклах навантаження [17].

При наявності довговічностей N_1 і N_{II} і навантажень F_1 і F'_R знаходимо параметр m лівого відрізка кривої втоми в навантаженнях

$$m = \lg(N_{II} / N_1) / \lg(F_1 / F'_R). \quad (21)$$

Параметр m однаковий в лівого відрізка кривої втоми в навантаженнях і в напругах [15]. Щоб знайти параметр C лівого відрізка кривої втоми в напругах, скористаємося виразом (21) і відомою [18] наближеною залежністю для сталених деталей

$$C = 2,632 + 2,846m. \quad (22)$$

Знаючи параметри m і C лівого відрізка, обчислюємо напруги σ_1 або σ'_R на рівні навантажень F_1 і F'_R . Наприклад, напруга σ_1 буде

$$\sigma_1 = (10^C / N_1)^{1/m}. \quad (23)$$

За відомою із виразу (23) напругою σ_1 при заданому навантаженні F_1 знаходимо розмір поперечного перерізу деталі і на його основі розробляємо її конструкцію, яку потім оцінюємо в перевірному розрахунку.

Для оцінки вихідної міцності деталі за фактичним напрацюванням N_{Σ} і відомим режимом навантаження β_1 і β_{2B} вдаємося до способу, що приводить до виразу [19]

$$\sigma_R = \sigma_1 n_1 / (n_1 + 10^{5,1} \cdot \beta'_1), \quad (24)$$

де β'_1 – циклове відношення, $\beta'_1 = n_1 / N_1$. Ним треба попередньо задаватися, для чого запропоновано емпіричне співвідношення [20]

$$\beta'_1 = \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_{2E}} \quad (25)$$

Співвідношення (25) не можна вважати досить досконалим, бо воно не враховує рівень міцності деталі і незалежно від нього дає однакові значення β'_1 при однаковому режимі навантаження, що не зовсім логічно. Проте використання його в виразі (24) давало за окремими винятками досить задовільну оцінку конструкційної міцності деталей, випробуваних багатьма авторами при нерегулярному навантаженні [19, 20]. Зазначимо, що циклове відношення β'_1 за виразом (25) тлумачилося як таке, що впливає з граничного пошкодження $a = 1$, тобто знайденого за лінійною гіпотезою.

Серед інших можливих способів є й такий, що спирається на відношення f за виразом (19), на якому докладно тут не зупиняємося. Підкреслимо тільки, що в ньому використовується намагання знайти відношення f за однозначно відомим відношенням f'

$$f' = 1 + 10^{5,1} / N_{\Sigma}^{\circ}$$

яке трохи більше за відношення f , бо напрацювання N_{Σ} завжди менше за довговічність N_{2E} . Знайшовши відношення f за відношенням f' , можна оцінити і границю витривалості σ_R деталі, оскільки максимальна напруга спектра відома, а відношення її до границі витривалості впливає з умови еквівалентності двоступінчастого режиму навантаження регулярному режиму за лінійною гіпотезою.

Висновки. За допомогою невідворотного прийому – зведенню багатоступінчастого режиму навантаження до еквівалентного двоступінчастого – і використання індивідуальної кривої втоми деталі, що зруйнувалася, вдалося довести прийнятність лінійної гіпотези підсумування втомних пошкоджень для визначення руйнівного пошкодження без будь-яких застережень. Це спростовує необхідність коригування лінійної гіпотези для оцінки граничного стану деталей.

На основі лінійної гіпотези в наведеному тлумаченні легко вирішуються задачі забезпечення потрібного напрацювання, вибору відповідної конструктивної міцності деталей, можливості нею варіювати. Для проектувальних розрахунків, коли проводиться пошук потрібних розмірів деталей з вимогою оптимальної їх маси при заданих нерегулярних режимах навантаження в силах або моментах, наводяться неочевидні рішення із застосуванням лінійної гіпотези і відомих закономірностей втомного руйнування.

Зазначені підходи використовуються також для визначення вихідної конструкційної міцності деталей, що зруйнувалися від втоми при нерегулярному навантаженні за відомими напрацюванням і режимом.

Перспектива вирішення низки наведених задач виявилась реальною після того, як завдяки згаданому прийому і лінійній гіпотезі була обумовлена можливість оптимального призначення довговічності на рівні максимального навантаження спектра в процесі проектування деталей.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени.* – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
2. *Олейник Н.В. Выносливость деталей машин.* – К.: Техніка, 1979. – 200 с.
3. *Троценко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении.* – К.: Наукова думка, 1981. – 344 с.
4. *Почтенный Е.К. Ускоренный метод линейного суммирования усталостных повреждений с учетом снижения предела выносливости // Вестник машиностроения.* – 1986. - № 8. – С. 33-37.
5. *Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин.* – М.: Высшая школа, 1991. – 320 с.
6. *Сопrotивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие в 2-х частях / В.Т.Троценко, А.Я.Красовский, В.В.Покровский и др.* – К.: Наукова думка, 1993, 1994. – Ч. 1.- 288 с. - Ч. 2. – 702 с.
7. *Олейник Н.В., Греченко П.И. Линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений и ускоренное определение предела выносливости деталей машин / Проблемы прочности.* – 1989. - № 3. – С. 113-115.
8. *Олейник Н.В., Пахомова Н.И. К расчету долговечности деталей строительных и дорожных машин при нерегулярном нагружении // Строительные и дорожные машины.* – 1987. - № 4. – С. 25-27.
9. *Олейник Н.В., Пахомова Н.И. Вероятностная оценка усталостной долговечности деталей строительных и дорожных машин при нерегулярном нагружении // Строительные и дорожные машины.* – 1987. - № 10. – С. 27-28.
10. *Олейник Н.В., Греченко П.И., Скляр С.П. Определение характеристик усталости методом возрастающей нагрузки.* – Львов, 1984. – 60 с. – (Препринт / АН УССР. Физ.-мех. ин-т; № 82).
11. *Олейник Н.В., Скляр С.П. Ускоренные испытания на усталость.* – К.: Наукова думка, 1985. – 304 с.

12. Олейник Н.В., Конопльов А.В. Ускоренное определение характеристик сопротивления усталости материалов и деталей // Заводская лаборатория. – 1994. - № 11. – С. 54-57.
13. Решетов Д.Н. Детали машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
14. Олейник Н.В., Магденко А.Н., Скляр С.П. Сопротивление усталости материалов и деталей машин в коррозионных средах. – К.: Наукова думка, 1987. – 200 с.
15. Олейник Н.В. Высокопроизводительные испытания на усталость и оценка индивидуальных характеристик сопротивления усталости. – Одесса: Астропринт, 1999. – 184 с.
16. Олійник М.В., Шумило О.М. Оцінка границі витривалості сталевих деталей // Проблеми техніки. – 2002. - № 2. – С. 93-103.
17. Олійник М.В., Скляр С.П. Зв'язки між параметрами кривої втоми при асиметричному навантаженні деталей // Проблеми техніки. – 2003. - № 2. – С. 101-110.
18. Олейник Н.В., Мезенцев И.С. О взаимосвязи усталостных характеристик конструкционных сталей // Детали машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1972. – Вып. 15. – С. 77-84.
19. Олійник М.В. Визначення індивідуальних властивостей деталей, що зруйнувалися від втоми // Вісник Транспортної академії України. – 2002. - № 6. – С. 47-52.
20. Олійник М.В., Шумило О.М. До питання про визначення вихідної міцності деталі, що зруйнувалася при нерегулярному навантаженні // Проблеми техніки. – 2003. - № 1. – С. 38-46.

СОДЕРЖАНИЕ

Проектирование и мореходные качества судов

Г.В. Егоров ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ ГРУЗОВЫХ СУДОВ ОГРАНИЧЕННОГО РАЙОНА ПЛАВАНИЯ	3
М. Б. Косой ВЕРОЯТНОСТЬ СОХРАНЕНИЯ ФИКСИРОВАННОЙ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЕТРА И ВОЛНЕНИЯ	23
В.В. Козляков, И.Ф. Давыдов, А.В. Ставицкий О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ ОБОСНОВАНИИ ЗАПАСОВ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КРЕПЛЕНИЙ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ГРУЗОВ	43
П.И. Яркин, А.С. Мальцев, Е.В. Калининченко ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗГОНА И ПОДТОРМАЖИВАНИЯ СУДНА. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД	63

Организация перевозок и управление работой флота

А.Г. Шибаев ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕШЕНИЙ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СУДОХОДНЫХ КОМПАНИЙ	72
А.Г. Шибаев, В.З. Ананьина СОГЛАСОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ПО ОПЕРАТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ РАБОТОЙ ФЛОТА И ПОРТОВ В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ	89
В.К. Козырев ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ МОРСКОЙ ПЕРЕВОЗКИ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ	95
В.К. Козырев ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР И ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ГАЗОВОЗОВ	103
Л.В. Москалюк, М.Я. Постан ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ В ПОЛУМАРКОВСКОЙ СРЕДЕ	111

Управление морскими портами

П.А. Макушев К ЦЕНТРАЛИЗОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ ГРУЗОПОТОКАМИ ПОРТОВ	128
--	-----

В.З. Ананьина ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА БИЗНЕС-ПЛАНА РАЗВИТИЯ МОРСКОГО ПОРТА	138
А.А. Малаксиано, Н.А. Малаксиано О СООТНОШЕНИИ ЗАГРУЗКИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МОРСКОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА СОВОКУПНОСТИ ВЗАИМО- ЗАМЕНЯЕМЫХ ПРИЧАЛОВ	144

Гидротехническое строительство

С.Ф. Клованич ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ГИБКИХ ПОДПОРНЫХ СТЕНКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	157
Ю.Л. Винников, В.С. Яковлев ЗАСТОСУВАННЯ ПЕНЕТРАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПАЛЬ В ГЛИНИСТИХ ГРУНТАХ	167
В.А. Гришин, В.И. Снисаренко ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯ- НИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФУНДА- МЕНТОВ ВБЛИЗИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ	172
А. В. Черных РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОПУСКНОМ СПОСОБЕ ИХ ВОЗВЕДЕНИЯ	185
Ю.А. Фортученко ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МОДЕЛЕЙ СТАЛЬНЫХ ТРУБЧАТЫХ СВАЙ	191

Кондиционирование.

Диагностирование механизмов и систем

В.О. Загоруйко, О.А.Вассерман, О.Г. Слинько РІВНЯННЯ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ КОЕФІЦІЕНТІВ ВНУТРІШНЬОГО МАСОПЕРЕНОСУ ДЕРЕВИННО-ВОЛОКНИС- ТИХ МАТЕРІАЛІВ	196
В.В. Выгужанин ПОДДЕРЖАНИЕ КОМФОРТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНДИЦИО- НИРУЕМОГО ВОЗДУХА В СУДОВЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ	208
А.В. Шахов ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	214
В.П. Матвеевко, И.В.Виниченко, С.А. Кубыщенко ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РВС-ТЕХ- НОЛОГИИ В ПАРАХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ	224
М.В. Олійник ПІДСУМУВАННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ І ОЦІНКА КОНСТ- РУКЦІЙНОЇ МЦНОСТІ ДЕТАЛЕЙ	230

Наукове видання

ВІСНИК
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Збірник наукових праць

*Українською, російською
та англійською мовами*

Випуск 13

*Свідоцтво про державну реєстрацію:
серія КВ № 278
від 25.07.1997 р.*

Комп'ютерна верстка та розробка
оригінал-макету збірника - *Мусієчко Т.Г.*

Підписано до друку з оригінал-макету 05.05.04.
Формат 70×108/16. Папір офсетний. Ум.друк.арк. 15,4.
Замовлення № 350. Тираж 100.

**Адреса редакційної колегії та видавництва ОНМУ:
65029, Одеса, вул. Мечникова, 34, тел. 728-31-14.**